

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Návrh a nastavení elektrických ochran
pro cukrovar Opava - Vávrovice

Project and Adjustment of Switch Station Protections
for Sugar Factory

2010

Karel BLECHA

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Ing. Karel Blecha**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh a nastavení elektrických ochran pro cukrovar Opava - Vávrovice**
Project and Adjustment of Switch Station Protections for Sugar Factory

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor ochran a jistění se zaměřením na ochrany vedení 22 kV a ochrany transformátorů.
2. Teoretický rozbor výpočtu zkratových proudů.
3. Popis a zhodnocení současného stavu chránění rozvodu v cukrovaru Opava - Vávrovice.
4. Popis ochranných návrhů pro chránění rozvodu.
5. Výpočet zkratových poměrů pro nastavení ochran.
6. Návrh a nastavení ochran vedení vn a ochranných transformátorů.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Janíček, F. a kol.: Digitální ochrany v elektrizační soustavě. STU Bratislava, 2004.
2. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku. SNTL, Praha 1991.
3. Haluzík, E.: Ochrany a automatiky v elektrických sítích. Skriptum VUT Brno, 1985.
4. ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.
5. ČSN 33 3051. Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení. Listopad 1992.
6. Firemní literatura a katalogy, technická dokumentace rozvodu cukrovaru Opava - Vávrovice

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

**„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“**

20. srpna 2010

Karel BLECHA

Abstrakt

Cílem této práce je návrh a nastavení elektrických ochran pro cukrovar Opava - Vávrovice. Za tímto účelem je zde proveden teoretický rozbor výpočtu na základě ČSN EN 60909-0. Dále je uveden současný stav konfigurace sítí a rozvoden, včetně možných provozních variant jejich napájení, jež vystihují přiložená schémata.

V další části práce jsou provedeny výpočty maximálních a minimálních zkratových proudů a jejich výsledky jsou uspořádány dle jednotlivých variant do přehledných tabulek. Tyto hodnoty následně slouží pro posouzení zkratové odolnosti rozvoden a nastavení zkratových ochran.

Klíčová slova

Impedance, reaktance, zkrat, počáteční souměrný rázový zkratový proud, nárazový zkratový proud, zkratový výkon, asynchronní motor, generátor, reaktor, transformátor, rozvodna.

Abstract

The purpose of this work is project and adjustment of switch station protections for sugar factory Opava – Vávrovice. This document includes a theoretical analysis of the calculation performed on the basis of ČSN EN 60909-0. Further, it describes the actual configuration of networks and distribution points, including all possible operational variants of their power supply, which are described in the attached appendices.

In next parts of the work, there are performed calculations of maximum and minimum short-circuit flows. Various options are summarized in the well-arranged tables. These values subsequently serve for evaluation of the substation short-circuit stability and settings of the short-circuit protections.

Key words

Impedance, reactance, short-circuit, initial symmetrical short-circuit current, peak short-circuit current, short-circuit power, asynchronous motor, generator, reactor, transformer, substation.

Seznam použitých symbolů a zkratek

| | | |
|-----------|--|--------------------|
| I_k | ustálený zkratový proud | [A] |
| I_k'' | počáteční rázový zkratový proud | [A] |
| I_{ke} | ekvivalentní oteplovací proud | [A] |
| I_n | jmenovitý proud | [A] |
| I_r | rozběhový proud | [A] |
| I_{th} | ekvivalentní oteplovací proud | [A] |
| I_v | vztažný proud | [A] |
| K | koeficient pro výpočet oteplení | [-] |
| P | činný výkon | [W] |
| R | rezistence | [Ω] |
| S | průřez vodiče | [mm ²] |
| S_k'' | rázový zkratový výkon zkratového obvodu | [VA] |
| S_k | zkratový výkon | [VA] |
| S_{nG} | jmenovitý zdánlivý výkon alternátoru | [VA] |
| S_{nM} | jmenovitý zdánlivý výkon motoru | [VA] |
| S_{nT} | jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru | [VA] |
| S_R | jmenovitý zdánlivý výkon reaktoru | [VA] |
| S_v | vztažný výkon | [VA] |
| U_n | jmenovité napětí | [V] |
| $U_{výp}$ | výsledné výpočtové napětí sousledné složky | [V] |
| X | reaktance | [Ω] |
| X_d'' | podélná rázová reaktance synchronního stroje | [Ω] |
| Z | impedance | [Ω] |
| Z_k | zkratová impedance | [Ω] |
| c | napěťový činitel | [-] |
| i_p | nárazový zkratový proud | [A] |
| i_z | poměrný záběrový proud motoru | [-] |
| k_e | koeficient pro výpočet I_{th} | [-] |
| u_k | jmenovité napětí nakrátko | [%] |
| κ | součinitel nárazového zkratového proudu | [-] |

Dolní indexy

| | |
|-------|----------------------------|
| (1) | sousledná složka |
| (2) | zpětná složka |
| (0) | nulová složka |
| $k1$ | jednofázový zkrat |
| $k2$ | dvoufázový zkrat izolovaný |
| $k3$ | trojfázový zkrat |
| max | maximum |
| min | minimum |
| AM | asynchronní motor |
| G | generátor |
| R | reaktor |
| S | soustava |
| T | transformátor |
| TG | turbogenerátor |

| | |
|---|---------------------------------|
| ÚVOD | 4 |
| 1. TEORETICKÝ ROZBOR NAPÁJENÍ PRŮMYSLVÝCH ROZVODŮ | 5 |
| 1.1 Struktura průmyslových rozvodů | Chyba! Záložka není definována. |
| 1.2 Základní druhy rozvodů | 5 |
| 1.3 Požadavky na průmyslové rozvody | 7 |
| 1.4 Rozvody elektrické energie v cukrovarnickém provozu | 7 |
| 2. USPOŘÁDÁNÍ SÍTĚ MSC, A.S. – ODŠTĚPNÉHO ZÁVODU OPAVA | 8 |
| 2.1 Rozvodná síť | 8 |
| 2.2 Provozované konfigurace sítě | 9 |
| 3. TEORIE VÝPOČTU ZKRATŮ | 9 |
| 3.1 Základní pojmy | 9 |
| 3.2 Druhy zkratů | 11 |
| 3.2.1 Souměrné zkraty | 12 |
| 3.2.2 Neosymetrické zkraty | 12 |
| 3.3 Metoda souměrných složek | 12 |
| 3.4 Postup výpočtu zkratových proudů | 13 |
| 3.5 Podmínky pro stanovení maximálního a minimálního zkratového proudu | 13 |
| 3.6 Vztahy pro výpočet parametrů prvků soustavy ve fyzikálních jednotkách | 14 |
| 3.6.1 Síťové napáječe | 14 |
| 3.6.2 Synchronní alternátory | 15 |
| 3.6.3 Reaktory omezující zkratový proud | 15 |
| 3.6.4 Asynchronní motory | 16 |
| 3.6.5 Dvouvíňové transformátory | 16 |
| 3.6.6 Venkovní vedení a kabely | 17 |
| 3.6.7 Přepočítání parametrů na napěťovou hladinu v místě zkratu | 17 |
| 3.7 Výpočet zkratových proudů ve fyzikálních jednotkách | 18 |
| 3.7.1 Počáteční rázový zkratový proud I''_k | 18 |
| 3.7.2 Nárazový zkratový proud i_p | 18 |
| 3.7.3 Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} | 19 |
| 3.8 Výpočet sousledných parametrů prvků soustavy v poměrných jednotkách | 19 |

| | | |
|-----------|--|--|
| 3.8.1 | Soustava | 19 |
| 3.8.2 | Alternátor | 19 |
| 3.8.3 | Reaktor | 20 |
| 3.8.4 | Transformátor | 20 |
| 3.8.5 | Vedení..... | 20 |
| 3.8.6 | Asynchronní motor..... | 21 |
| 3.9 | Výpočet zkratových proudů v poměrných jednotkách | 21 |
| 3.9.1 | Počáteční rázový zkratový proud I''_k | 21 |
| 4. | OCHRANY | 22 |
| 4.1 | Základní pojmy | Chyba! Záložka není definována. |
| 4.2 | Ochrany vedení [4] | 23 |
| 4.2.1 | Nadproudové ochrany..... | 23 |
| 4.3 | Ochrany transformátoru [4]..... | 25 |
| 4.3.1 | Rozdílová ochrana transformátoru | 25 |
| 4.3.2 | Plynové relé | 26 |
| 4.3.3 | Nádobová ochrana | 26 |
| 5. | VARIANTY PROVOZU ROZVODEN..... | 27 |
| 5.1 | Varianta č. 1..... | 27 |
| 5.2 | Varianta č. 2..... | 27 |
| 5.3 | Varianta č. 3..... | 27 |
| 6. | VSTUPNÍ DATA PRO VÝPOČET | 28 |
| 6.1 | Zkratové příspěvky distribuční sítě..... | 28 |
| 6.2 | Parametry generátorů..... | 28 |
| 6.3 | Parametry transformátorů | 28 |
| 6.4 | Parametry reaktorů | 29 |
| 6.5 | Parametry kabelů | 29 |
| 6.6 | Tabulkové hodnoty instalovaných kabelů..... | 30 |
| 6.7 | Parametry asynchronních motorů | 30 |
| 7. | ROZVODNY - POPISY VÝVODŮ | 31 |
| 8. | VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ | 33 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 8.1 | Příklad výpočtu maximálních hodnot – Varianta č. 1 | 34 |
| 8.1.1 | Výpočet sousledných parametrů zkratového obvodu | 35 |
| 8.1.2 | Výpočet maximálního počátečního rázového zkratového proudu | 38 |
| 8.1.3 | Výpočet nárazového zkratového proudu i_p | 38 |
| 8.1.4 | Přehled výsledků pro variantu č. 1 | 40 |
| 8.1.5 | Přehled výsledků pro variantu č. 2 | 40 |
| 8.1.6 | Přehled výsledků pro variantu č. 3 | 40 |
| 8.2 | Příklad výpočtu minimálních hodnot – Varianta č. 1 | 41 |
| 8.2.1 | Výpočet sousledných parametrů zkratového obvodu | 42 |
| 8.2.2 | Výpočet minimálního počátečního rázového zkratového proudu | 43 |
| 8.2.3 | Přehled výsledků pro variantu č. 1 | 44 |
| 8.2.4 | Přehled výsledků pro variantu č. 2 | 44 |
| 8.2.5 | Přehled výsledků pro variantu č. 3 | 44 |
| 9. | <u>NASTAVENÍ OCHRAN</u> | 45 |
| 9.1 | Výpočet pro nastavení zkratových ochran | 45 |
| 9.1.1 | Přehled výsledků pro nastavení I_r | 46 |
| 9.2 | Nastavení vypínacích časů | 46 |
| 9.2.1 | Přehled výsledků výpočtů pro maximální dobu vypnutí zkratu | 48 |
| 9.3 | Nastavení linkových ochran | 49 |
| 9.4 | Nastavení ochran transformátorů | 49 |
| 10. | <u>NAVRŽENÉ TYPY OCHRAN</u> | 50 |
| 10.1 | Stručná charakteristika ochran | 50 |
| 11. | <u>ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU CHRÁNĚNÍ</u> | 51 |
| 12. | <u>ZÁVĚR</u> | 51 |
| | <u>SEZNAM LITERATURY:</u> | 52 |
| | <u>SEZNAM PŘÍLOH:</u> | 53 |

Úvod

Úkolem této diplomové práce je návrh a nastavení elektrických ochran v Moravskoslezských cukrovarech, a.s., odštěpném závodě cukrovaru Opava – Vávrovice. Vzhledem ke struktuře průmyslové sítě tohoto závodu je v práci řešen především návrh a nastavení elektrických ochran pro vedení a transformátory. Výpočet dokumentuje zkratové poměry v hlavních rozvodnách za účelem kontroly jejich zkratové odolnosti a návrhu nastavení ochran v nich instalovaných. Zadavatelem této práce jsou Moravskoslezské cukrovary a.s.

Vlastní výpočet je řešen pro tři varianty provozu se zaměřením na výpočet při trojfázovém zkratu, který je daleko větší než ostatní druhy zkratů. Při řešení jsou respektovány všechny zadané hodnoty prvků soustavy včetně průřezů a délek kabelových tras.

V první části diplomové práce je proveden teoretický rozbor struktury průmyslového rozvodu, požadavky na něj kladené a závěr kapitoly je věnován koncepci napájení zohledňující specifika cukrovarnického provozu.

V druhé části je popsána teorie výpočtu zkratů, teorie ochran se zaměřením na vedení a transformátory, kterým je věnována tato práce.

Poslední část je zaměřena na rozbor provozních variant cukrovarnické sítě, které jsou předmětem výpočtů zkratových poměrů. Jsou uvedeny štítkové a katalogové parametry prvků užitých ve výpočtech. V přehledných tabulkách jsou popsány jednotlivé rozvodny s označením vývodů, u kabelů jsou uvedeny typy, průřezy a délky. Výpočet je proveden pro všechny varianty provozu, z nichž vyplývají mezní přípustné hodnoty proudů a časů nastavení ochran pro jednotlivé vývody. V souladu s požadavkem zadavatele jsou navrženy typy ochran z produkce firmy Areva T&D.

1. Teoretický rozbor napájení průmyslových rozvodů

1.1 Struktura průmyslových rozvodů

Na rozvod v průmyslových podnicích jsou kladeny vysoké nároky na bezpečnost, spolehlivost a také ekonomičnost tohoto rozvodu. Tyto požadavky vyplývají především ze skutečnosti, že v mnoha průmyslových provozech může dojít při přerušení dodávky elektrické energie k ohrožení lidského života, zdraví a mohou vzniknout značné materiální škody.

Volba a uspořádání rozvodných systémů v průmyslových závodech musí směřovat k provozně spolehlivým, investičně i provozně ekonomicky vhodným řešením. Vhodné řešení závisí jak na plošné velikosti průmyslového podniku, na instalovaných spotřebičích co do jejich příkonu, typu, počtu, seskupení v provozu atd. Dalším kritériem je pak volba počtu a výše použitých napětíových hladin použitých pro rozvod v závodě jednak podle možností existující distribuční sítě v místě, popřípadě zvážit možnost vybudování nových přívodních linek, požadovaný stupeň zajištění dodávky elektrické energie jak pro celý závod, tak pro některé jeho významné spotřebiče.

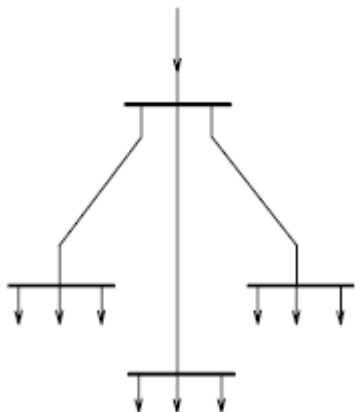
Průmyslové závody jsou napájeny z veřejného rozvodného systému elektrické energie. Velikost vstupního napětí na přípojce závodu (napětí napájecí veřejné sítě) závisí na velikosti odebíraného elektrického výkonu a požadovaném stupni zajištění jeho dodávky a stanovuje se po dohodě s příslušnou distribuční společností. Velké průmyslové závody se obvykle připojují na napětí 110 kV nebo na síť vn (35 kV, 22 kV nebo 10 kV). Jen zcela malé závody jsou napájeny přímo z veřejné rozvodné sítě nn. [3]

Elektrická energie se z distribuční rozvodné soustavy přivádí do vstupní stanice závodu, kde je osazeno měření odebírané elektrické energie a dále napájecím rozvodem napájeny jednotlivé provozní soubory. V těchto provozních souborech jsou napájeny jednotlivé spotřebiče provozními rozvody. Rozvod elektrické energie v průmyslových rozvodech je výhodné provozovat na úrovni vysokého napětí a transformaci na hladinu nízkého napětí provádět co možná nejbližší k vlastním spotřebičům z důvodů minimalizace úbytků napětí a ztrát. [2]

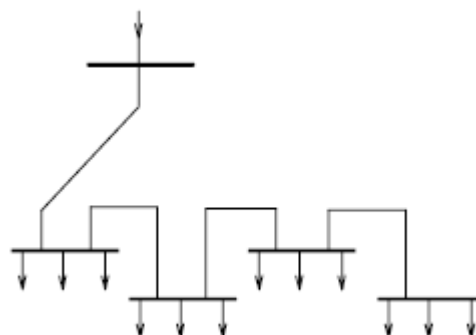
1.2 Základní druhy rozvodů

Základními druhy rozvodných sítí v průmyslových rozvodech jsou síť paprskové, síť průběžné, síť okružní a síť mřížové. Další druhy lze vytvořit kombinací uvedených druhů nebo jejich zdvojením, čímž vznikne například síť dvoupaprsková. **Síť paprskové** (obr. 1) jsou charakteristické vedením, které vychází z napájecího místa a zásobuje jednotlivé odběry. Každý vývod (paprsek) je

samostatný a nelze je vzájemně spojovat, což způsobuje nízkou spolehlivost napájení. Úpravou paprskové sítě dostáváme **sít' průběžnou** (obr. 2), u které z napájecího místa vychází jeden vývod do nejbližšího napájeného místa a další napájené místa jsou zapojena za sebou. Tento typ sítě je přehledný, ale vzhledem ke své konfiguraci musí mít větší průřezy kabelů z napájecí rozvodny.

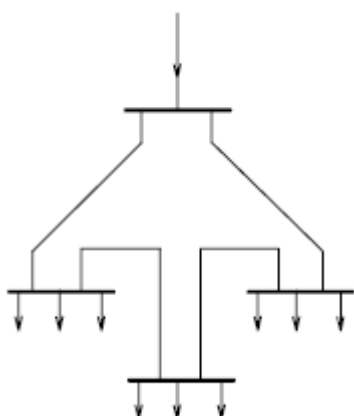


Obr. 1. Sít' paprsková

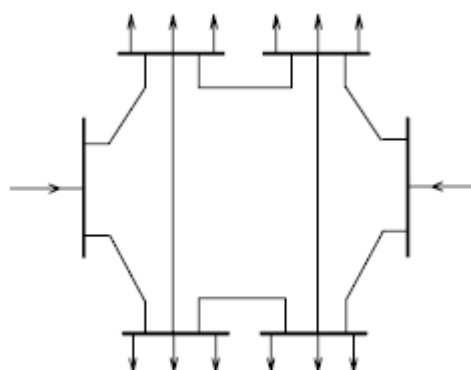


Obr. 2. Sít' průběžná

Dalším druhem sítě, která je jednoduchá, přehledná a hlavně spolehlivější je **sít' okružní** (obr. 3). U této sítě jsou jednotlivé paprsky vedeny tak, aby je bylo možné ve spínacích stanicích spínat a bylo možno zajistit napájení z více stran. Většinou se tento typ rozvodu provozuje jako rozpojený a při poruše se provádí příslušné manipulace. Nejsložitější a zároveň nejspolehlivější při zajištění spolehlivosti dodávky elektrické energie je **sít' mřížová** (obr. 4). U těchto sítí obvykle pracují do uzlu dva nebo více zdrojů, což umožňuje v případě poruchy odstavit vadný přívod a napájet odběr z dalších zdrojů.



Obr. 3. Sít' okružní



Obr. 4. Sít' mřížová

Vzájemnou kombinací eventuálně zdvojením různých druhů sítí se jejich vlastnosti mění a je věcí podrobného rozboru technického a ekonomického, jaký druh sítě volit pro daný průmyslový rozvod, aby byly splněny všechny požadavky.

1.3 Požadavky na průmyslové rozvody

Základním požadavkem na průmyslový rozvod elektrické energie je přenos energie od zdroje až k jednotlivým spotřebičům. Rozvodný systém musí umožnit přenos elektrické energie o dostatečném výkonu a kvalitě, potřebné pro zajištění spolehlivého a bezporuchového chodu spotřebičů. Další podstatné požadavky na průmyslové rozvody se dají shrnout do následujících bodů:

- bezpečný provoz
- provozní spolehlivost
- přehlednost a vzhled
- možnost rychlého odstranění poruch
- vyloučení rušivých vlivů na vlastní a okolní zařízení
- hospodárnost provozu
- možnost rozšíření

Dodržení zmíněných požadavků je vázáno na velikost zkratových výkonů v soustavě. Velké zkratové výkony kladou vyšší požadavky na dimenzování při zachování bezpečnosti vypínání zkratových proudů. Pro omezení těchto zkratových výkonů je výhodné rozvodný systém rozdělit na dílčí části a omezit tak velikost zkratových proudů. Zejména ve složitějších provozech či v provozech s vyšší náročností, jako jsou některé rozvody v cukrovarnických závodech, toto řešení vyžaduje, aby v závislosti na důležitosti zařízení byla při poruše v jedné části rozvodu zajištěna dodávka elektrické energie z jiné, poruchou nepostižené části.

1.4 Rozvody elektrické energie v cukrovarnickém provozu

Pro základní rozvod v cukrovarnickém provozu je užívána izolovaná soustava vn IT 6 kV. V případě velkých kapacitních proudů je soustava kompenzovaná Petersenovou induktivní cívkou v uzlu transformátoru, popřípadě se přechází na zemnění uzlu činným odporem.

Hlavní provozy cukrovaru: kotelna, chladicí věže, dekantační stanice, extrakce, mlýn a odstředivkové stanice mají své vlastní vysokonapěťové rozvody. Všechny tyto provozy vyžadují dodávku el. energie podle 2. stupně zajištěnosti. S ohledem na možnosti distribuční sítě v místě závodu je použito napájení ve dvou hladinách, a to 22 kV a 6 kV.

Poslední stupeň transformace vn/nn je realizován pomocí transformátorů instalovaných buď přímo na provozech nebo na samostatných vybudovaných stanovištích v jejich těsné blízkosti.

Nízkonapěťová síť závodu je rozdělena do okruhů pro napájení osvětlovacích systémů se soustavou TN-C-S 400/230 V a zvláště pro okruhy ostatních technologických zařízení se soustavou TN-S 400/230 V nebo IT 400 V. Toto uspořádání zajišťuje při poruchách způsobených provozními zkraty v obvodech napájejících nn motory funkčnost osvětlovacích systémů.

2. Uspořádání sítě MSC, a.s. – odštěpného závodu Opava

2.1 Rozvodná síť

Moravskoslezské cukrovary, a.s. – odštěpný závod Opava byl vybudován v 50. letech minulého století na okraji Opavy. Cukrovar Opava je výrobcem elektrické energie, která vzniká jako vedlejší produkt při redukci tlaku páry pro technologii výrobních provozů. Pára je vyráběna ve vlastní kotelně na tuhá paliva. Tlak páry na výstupu z kotlů je 2 MPa, což je pro technologii příliš vysoká hodnota. Pára je redukována na dvou protitlakách soustrojích a její tlak na výstupu z turbín je 0,6 MPa. Závodní elektrárna je výrobcem elektrické energie pro potřeby závodu a přebytky jsou pak dodávány do sítě ČEZ Distribuce a.s. Hodnota okamžitého výkonu vyráběného turbogenerátory a dodávaného do distribuční sítě značně závisí na okamžité spotřebě páry výrobní technologií, a ta je v čase velmi proměnná. Ostrovní provoz závodu je z výše uvedeného důvodu možný jen velmi omezeně, spíše jen jako stav k řízenému odstavení výroby, např. při výpadku přívodních linek. V tomto ostrovním provozu je pak napájena jen kotelna, nezbytná cirkulační čerpadla ve výrobě a osvětlení.

Pro napájení závodu z distribuční soustavy byly zřízeny dvě linky 22 kV - vn 20 (základní stav) a záložní vn 15. Obě linky jsou vedeny z rozvodny Opava- Jaktař s možností využít zásukově i rozvodnu Velké Hoštice. Rozvodná síť závodu je realizována na hladinách 22 kV a 6 kV a je výhradně kabelová s uložením v zemi nebo na kabelových energomostech.

Přehledové schéma rozvodu závodu je uvedeno v příloze číslo 1. Hlavní rozvodny závodu tvoří kobková rozvodna R1 – 22 kV, zapouzďřená rozvodna R2 – 6 kV a rozvodny jednotlivých provozů.

Rozvodna R1- 22 kV je volně stojící jednopodlažní jednosystémová kobková rozvodna obsahující rovněž stanoviště olejových transformátorů. Navazuje na ni zapouzďřená rozvodna R2 – 6 kV s plynem SF₆.

2.2 Provozované konfigurace sítě

Na provozu jsou instalovány dva synchronní turboalternátory TG1 a TG2. Vyvedení výkonu z nich je realizováno přes rozvodnu R2- 6kV. Počet generátorů připojených do sítě závisí na průtoku páry do technologie, běžným provozním stavem je chod obou soustrojí, přičemž spojka sběrů na rozvodně R2- 6 kV je rozpojena, jsou připojeny transformátory T1, T2, T3. Pro bezpečné zajištění dodávky elektrické energie v době ranních špičkových odběrů a pro případ sníženého výkonu turboalternátorů lze připnout i transformátor T4.

Druhou funkcí transformátoru T4 je napájení závodu v období mimokampaňového provozu, kdy jsou v závodě napájeny jen provoz y kotleny, provoz y skladovací, expediční a údržbové s řádově nižší spotřebou, nežli je tomu v době zpracování cukrové řepy.

3. Teorie výpočtu zkratů

3.1 Základní pojmy

Zkrat: náhodné nebo úmyslné spojení přes zanedbatelný odpor nebo impedanci dvou nebo více bodů obvodu, které mají při normálním provozu různá napětí.

Zkratový proud: proud, který teče místem zkratu po dobu trvání zkratu.

Doba trvání zkratu T_k : doba od okamžiku vzniku zkratu až do jeho konečného vypnutí ve všech fázích postižených zkratem.

Předpokládaný zkratový proud: proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí. V případě trojfázového zkratu se předpokládá, že proud vzniká současně ve všech třech fázích.

Souměrný zkratový proud: efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbanou eventuální aperiodickou složkou.

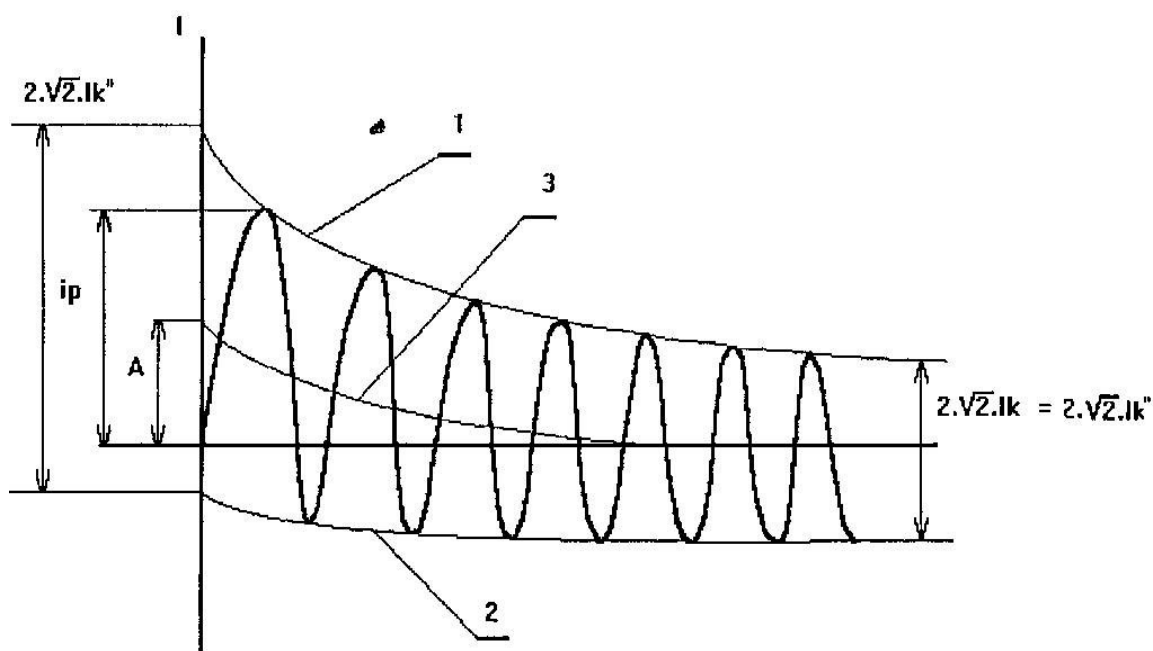
Počáteční souměrný rázový zkratový proud – I_k'' : efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Nárazový zkratový proud i_p : maximálně možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu.

Stojnosměrná složka i_{DC} zkratového proudu: střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule, podle (obr. 5). Posouvá průběh zkratového proudu asymetricky od osy x.

Ustálený zkratový proud I_k : efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodového jevu.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} : efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.



I_k'' - počáteční rázový zkratový proud, i_p - nárazový zkratový proud, I_k - ustálený zkratový proud, A - počáteční hodnota stejnosměrné složky i_{DC} , 1 - horní obalová křivka, 2 - dolní obalová křivka, 3 - zanikající složka i_{DC}

Obr. 5. Průběh zkratového proudu s klesající střídavou složkou (schématický diagram)

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' : Pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního rázového souměrného zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$.

Jmenovité napětí sítě U_n : sdružené napětí, kterým je soustava označena a k němuž se vztahují některé provozní charakteristiky.

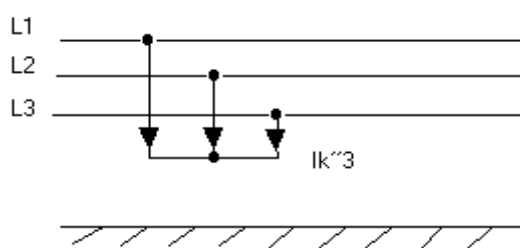
Napětí ekvivalentního zdroje $cU_n/\sqrt{3}$: napětí ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě pro výpočet zkratového proudu.

Napěťový součinitel c : poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n dělený $\sqrt{3}$. Pro výpočet maximálního a minimálního zkratového proudu pro hladinu vn a vvn je $c=1,1$ respektive $1,0$.

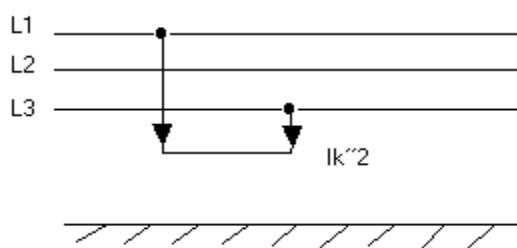
Elektricky vzdálený zkrat: zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.

Elektricky blízký zkrat: zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů.

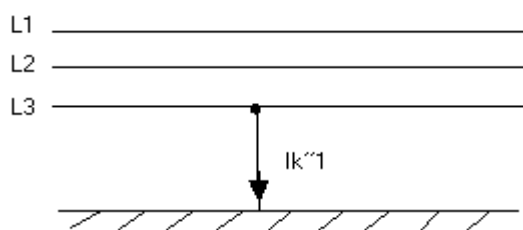
3.2 Druhy zkratů



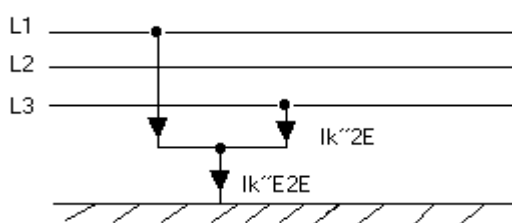
a) Souměrný trojfázový zkrat



b) Dvoufázový zkrat izolovaný



c) Jednofázový zkrat



d) Dvoufázový zkrat zemní

Obr. 6. Druhy zkratů

3.2.1 Souměrné zkrat

Mezi souměrné zkrat řadíme pouze trojpólový zkrat (obr.6a), který může nastat při kovovém spojení všech fází navzájem. Ve všech postižených vodičích teče stejný zkratový proud. Trojpólový zkrat se nejčastěji vyskytuje v kabelových sítích, kde se při jakémkoliv zkratu, vlivem oblouku, poruší izolace mezi fázemi.

3.2.2 Neouměrné zkrat

Na rozdíl od trojpólového souměrného zkratu, který působí na trojfázovou soustavu symetricky, jsou všechny ostatní zkrat příčinou nesymetrického zatížení a mluvíme o nesouměrných zkratech.

Patří k nim:

- dvoufázový zkrat izolovaný (obr.6b). Vzniká při spojení dvou různých fází.
- jednofázový zkrat (obr.6c). Vzniká při spojení fáze se zemí u soustavy s přímo uzemněným uzlem.
- dvoufázový zkrat zemní (obr.6d). Vzniká při spojení dvou různých fází a země.

3.3 Metoda souměrných složek

Výpočet hodnot proudu v trojfázových střídavých soustavách při souměrných i nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím metody souměrných složek. Metoda použitá pro výpočet je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazovány svou vnitřní impedancí. Předpokládá se přitom, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, například v případě transponovaných venkovních vedení. Výsledky výpočtu zkratových proudu mají přijatelnou přesnost také i v případě netransponovaných venkovních vedení. [7]

Při použití této metody vycházíme z rovnic (3.1). Zjistí se proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- proud sousledné složkové soustavy $\underline{I}_{(1)}$
- proud zpětné složkové soustavy $\underline{I}_{(2)}$
- proud netočivé složkové soustavy $\underline{I}_{(0)}$

Budeme-li fázi L1 považovat za referenční, potom jsou proudy \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} a \underline{I}_{L3} :

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \\
 \underline{I}_{L2} &= \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \\
 \underline{I}_{L3} &= \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\text{kde: } \underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3}$$

3.4 Postup výpočtu zkratových proudů

Při výpočtu zkratových proudů se postupuje podle níže uvedeného postupu:

- stanoví se impedance (reaktance, činné odpory) jednotlivých prvků zkratového obvodu
- sestaví se náhradní schéma, postupně se zjednoduší, určí se výsledná impedance zkratového obvodu
- následně se z výsledné impedance vypočte hodnota počátečního rázového zkratového proudu, nárazový zkratový proud i_p a ekvivalentní oteplovací proud I_{th}

Předpokládá se, že:

- v průběhu trvání zkratu se parametry prvků soustavy nemění
- soustava před zkratem se předpokládá symetrická
- zkraty vznikají v jednom místě a současně
- vliv elektrického oblouku na velikost zkratového proudu se neuvažuje

3.5 Podmínky pro stanovení maximálního a minimálního zkratového proudu

Stanovení maximální hodnoty zkratového proudu je potřebné pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} a pro výpočet maximálního času, do kdy je nutné zařízení odepnout, aby nedošlo k nadměrnému oteplení. Při tomto výpočtu se předpokládá:

- provozně přípustné zapojení soustavy, které v místě zkratu dává největší zkratové proudy
- chod uvažovaných zdrojů se jmenovitým výkonem a jmenovitým napětím při jmenovitém účinníku

- do zdroje zkratových příspěvků zahrnujeme vliv všech motorů
- teplota vodičů vedení 20 °C, při výpočtech s činným odporem

Výpočet minimální hodnoty zkratového proudu potřebujeme pro nastavení proudu zkratových ochran, které musí být nastaveny tak, aby vypnuly při nejmenším možném zkratovém proudu. Při výpočtu vycházíme z omezeného provozního stavu, při kterém se předpokládá:

- zapojení soustavy, která zajišťuje jen minimální odběry
- chod sníženého počtu zdrojů
- neuvažujeme se zkratovým příspěvkem synchronních a asynchronních strojů
- teplota venkovních a kabelových vedení při výpočtu rezistence se uvažuje 80 °C

3.6 Vztahy pro výpočet parametrů prvků soustavy ve fyzikálních jednotkách

3.6.1 Síťové napáječe

Sousledná složka:

$$Z_{(1)} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k3}''} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} \quad [\Omega, -, \text{kV}, \text{kA}, \text{MVA}]$$

(3.2)

Zpětná složka:

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} \quad [\Omega] \quad (3.3)$$

Nulová složka:

$$Z_{(0)} = c \cdot U_n^2 \cdot \left(\frac{3}{S_{k1}''} - \frac{2}{S_{k3}''} \right) \quad [\Omega, -, \text{kV}, \text{MVA}] \quad (3.4)$$

U_n jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe

S_k'' počáteční souměrný zkratový zdánlivý výkon v bodě připojení napáječe

I_k'' počáteční rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe

c napěťový součinitel

3.6.2 Synchronní alternátory

Sousledná složka:

$$Z_{(1)} = R_G + jX_d'' \quad [\Omega] \quad (3.5)$$

$$X_d'' = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} \quad [\Omega, \%, \text{kV}, \text{MVA}] \quad (3.6)$$

Zpětná složka:

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} \quad [\Omega] \quad (3.7)$$

Nulová složka:

$$Z_{(0)} = (0,15 \div 0,6) \cdot Z_{(1)} \quad [\Omega, \%, \text{kV}, \text{MVA}] \quad (3.8)$$

x_d'' rázová reaktance generátoru

a pro R_G lze s dostatečnou přesností použít následující hodnoty:

$R_G = 0,05X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ a $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$,

$R_G = 0,07X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ a $S_{rG} < 100 \text{ MVA}$,

$R_G = 0,15X_d''$ pro generátory s $U_{rG} \leq 1000 \text{ V}$

3.6.3 Reaktory omezující zkratový proud

Sousledné, zpětné a netočivé impedance si jsou rovny za předpokladu geometrické souměrnosti. Omezující reaktory se považují za součást zkratové impedance.

$$Z_R = \frac{10 \cdot u_{kR} \cdot U_{nR}}{\sqrt{3} \cdot I_{nR}} \quad [\Omega, \%, \text{kV}, \text{A}] \quad (3.9)$$

u_{kR} impedanční napětí reaktoru

U_{nR} jmenovité napětí reaktoru

I_{nR} jmenovitý proud reaktoru

3.6.4 Asynchronní motory

Asynchronní motory v soustavách nn a vn přispívají zkratovým proudem do místa zkratu. V případě trojfázových souměrných zkratů zkratové proudy asynchronních motorů rychle zanikají.

Sousledná složka:

$$Z_{(1)} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot S_{nAM}} \quad [\Omega, \text{kV}, -, \text{MVA}]$$

(3.10)

Zpětná složka:

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot S_{nAM}} \quad [\Omega, \text{kV}, -, \text{MVA}]$$

(3.11)

Nulová složka značně závisí na konstrukci stroje, proto ji určujeme výhradně z výrobní dokumentace nebo měřením.

Příspěvek zkratových proudů asynchronních motorů k proudu I_k'' je možné zanedbat, pokud platí vztah:

$$\Sigma I_{rM} \leq 0,01 \cdot I_k'' \quad [\text{kA}]$$

(3.12)

ΣI_{rM} součet jmenovitých proudů v sousedství místa zkratu

I_k'' zkratový proud v místě zkratu bez vlivů motorů.

3.6.5 Dvouvinut'ové transformátory

Sousledná složka:

$$Z_{(1)} = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad [\Omega, \%, \text{kV}, \text{MVA}] \quad (3.13)$$

Zpětná složka:

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad [\Omega, \%, \text{kV}, \text{MVA}] \quad (3.14)$$

Nulová složka se určuje podle zapojení vinutí transformátoru a podle konstrukce transformátoru.

3.6.6 Venkovní vedení a kabely

Sousledná složka:

$$(3.21) \quad R_{(1)} = R_k \cdot l \quad [\Omega, \Omega/\text{km}, \text{km}]$$

$$(3.22) \quad X_{(1)} = X_k \cdot l \quad [\Omega, \Omega/\text{km}, \text{km}]$$

Zpětná složka:

$$(3.23) \quad R_{(2)} = R_{(1)} = R_k \cdot l \quad [\Omega, \Omega/\text{km}, \text{km}]$$

$$(3.24) \quad X_{(2)} = X_{(1)} = X_k \cdot l \quad [\Omega, \Omega/\text{km}, \text{km}]$$

Nulová složka:

$$(3.25) \quad X_{(0)} = (2 \div 5,8) \cdot X_{(1)} \quad [\Omega]$$

3.6.7 Přepočet parametrů na napět'ovou hladinu v místě zkratu

Při výpočtech zkratových proudů v soustavách s různými hladinami napětí je nutné provést přepočet parametrů jednotlivých prvků z jedné hladiny do druhé. Přepočet provádíme podle následujících vzorců:

$$Z_2 = Z_1 \frac{1}{p^2} \quad [\Omega]$$

(3.27)

$$p^2 = \left| \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right|^2 \quad [-]$$

(3.28)

Z_2 přepočtená impedance na napět'ovou hladinu v místě zkratu

Z_1 původní vypočtená impedance

U_{1n} napětí hladiny, na kterém se nachází původní impedance

U_{2n} napětí, na které je původní impedance přepočtena

3.7 Výpočet zkratových proudů ve fyzikálních jednotkách

3.7.1 Počáteční rázový zkratový proud I''_k

Počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{(1)}|} \quad [\text{kA}, -, \text{kV}, \Omega]$$

(3.29)

Počáteční rázový zkratový proud při dvoufázovém zkratu:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)}|} = I''_{k3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad [\text{kA}, -, \text{kV}, \Omega]$$

(3.30)

Počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu:

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}|} \quad [\text{kA}, -, \text{kV}, \Omega]$$

(3.31)

c napěťový činitel

U_n jmenovité sdružené napětí sítě v místě zkratu

$Z_{(1)}$ výsledná sousledná impedance zkratového obvodu

$Z_{(2)}$ výsledná zpětná impedance zkratového obvodu

$Z_{(0)}$ výsledná nulová impedance zkratového obvodu

3.7.2 Nárazový zkratový proud i_p

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k \quad [\text{kA}, -, \text{kA}]$$

(3.32)

κ součinitel nárazového zkratového proudu

I''_k počáteční rázový zkratový proud

3.7.3 Ekvivalentní oteplovací proud I_{th}

$$I_{th} = \sqrt{(m+n)} \cdot I_k'' \quad [\text{kA}, -, \text{kA}] \quad (3.33)$$

- m součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky proudu
 n součinitel pro tepelné účinky střídavé složky proudu

3.8 Výpočet sousledných parametrů prvků soustavy v poměrných jednotkách

Druhým způsobem výpočtu parametrů prvků je výpočet v poměrných hodnotách. Zde volíme vhodně vztažný výkon S_v . Vztažné napětí U_v je napětí v místě zkratu.

3.8.1 Soustava

$$z_{(1)} = \frac{c \cdot I_v}{I_k''} = \frac{c \cdot S_v}{S_k} \quad (-, -, \text{kA}, \text{kA}, \text{MVA}, \text{MVA}) \quad (3.34)$$

- I_k'' počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu
 I_v vztažný proud odvozený ze vztažného výkonu
 S_k zkratový výkon soustavy při trojfázovém zkratu
 S_v vztažný výkon

3.8.2 Alternátor

$$x_{(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{100 \cdot S_{nG}} \quad (-; \%, \text{MVA}, \text{MVA}) \quad (3.35)$$

- x_d'' rázová reaktance alternátoru
 S_{nG} jmenovitý zdánlivý výkon alternátoru

3.8.3 Reaktor

$$x_{(l)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_R} \quad (-; \%, \text{MVA}, \text{MVA})$$

(3.36)

$$S_R = \sqrt{3} \cdot U_{sR} \cdot I_R \quad (\text{MVA}; \text{kV}, \text{kA})$$

(3.37)

u_k impedanční napětí reaktoru
 I_R jmenovitý proud reaktoru
 U_{sR} jmenovité sdružené napětí reaktoru
 S_R průchozí výkon reaktoru

3.8.4 Transformátor

$$z_{(l)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{nT}} \quad (-; \%, \text{MVA}, \text{MVA})$$

(3.38)

$$r_{(l)} = \frac{P_{knT} \cdot S_v}{S_{nT}^2} \quad (-; \text{MW}, \text{MVA}, \text{MVA})$$

(3.39)

$$x_{(l)} = \sqrt{z_{(l)}^2 - r_{(l)}^2} \quad (-; -, -)$$

(3.40)

u_k jmenovité napětí nakrátko
 S_{nT} jmenovitý výkon transformátoru
 P_{knT} jmenovité ztráty nakrátko

3.8.5 Vedení

$$x_{(l)} = X_k \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_s^2} \quad (-; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{km}, \text{MVA}, \text{kV})$$

(3.41)

$$r_{(l)} = R_k \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_s^2} \quad (-; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{km}, \text{MVA}, \text{kV})$$

(3.42)

X_k reaktance sousledné složky vedení
 R_k rezistance sousledné složky vedení
 l délka vedení
 U_s jmenovité sdružené napětí vedení

3.8.6 Asynchronní motor

$$x_{(1)} = \frac{S_v}{i_z \cdot S_{nM}} \quad (-; \text{MVA}, -, \text{MVA})$$

(3.43)

i_z poměrný záběrný proud motoru

S_{nM} jmenovitý zdánlivý výkon motoru

3.9 Výpočet zkratových proudů v poměrných jednotkách

Pro vztažný proud platí vztah:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} \quad (\text{kA}; \text{MVA}, \text{kV}) \quad (3.45)$$

3.9.1 Počáteční rázový zkratový proud I''_k

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k3} při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot I_v}{|\bar{Z}_{(1)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kA}, -) \quad (3.46)$$

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k2} při dvoufázovém zkratu:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_v}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kA}, -, -) \quad (3.47)$$

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k1} při jednofázovém zkratu:

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot 3 \cdot I_v}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kA}, -, -) \quad (3.48)$$

4. Ochrany

4.1 Základní pojmy

Ochrana: je zařízení, které kontroluje chod určité části energetického systému a slouží k zajištění provozní bezpečnosti a spolehlivosti elektrického zařízení. Ochrana získává pomocí měřicího transformátoru nebo jiného snímače informaci měřených veličinách a rozhoduje, zda je chráněný objekt v poruše nebo v normálním provozním stavu.

Chráněný objekt: je zařízení, které přenáší energii v rámci svého okolí. To může být například:

- transformátor
- vedení
- přípojnice
- generátor

Okamžitou funkci chráněného objektu lze určit pomocí stavových veličin (např. napětí, proud, výkon, kmitočet), jejichž velikost charakterizuje chování objektu. Ochrana zajišťuje, aby jmenovité veličiny byly v požadovaných mezích.

Porucha: je stav objektu mimo meze normálního stavu. V provozu elektrizační soustavy se mohou vyskytnout následující poruchové stavy:

- Zkrat
- Přetížení
- Přepětí
- Podpětí
- Nesouměrnost proudů
- Zemní spojení
- Zpětný tok výkonu

Zvýšení nebo snížení kmitočtu

4.2 Ochrany vedení

[4]

Ochrany vedení dělíme do dvou základních skupin:

a) Stupňové ochrany:

jsou to takové ochrany, které ke svému selektivnímu působení potřebují časové zpoždění vhodně odstupňované. Do této skupiny patří nadproudové ochrany a ochrany distanční.

b) Srovnávací ochrany:

jsou to ochrany, které pracují na principu srovnání stavové veličiny na vstupu a výstupu chráněného objektu a pokud jsou tyto hodnoty různé, vypínají okamžitě bez časového zpoždění. Do této skupiny patří rozdílové (diferenciální) ochrany a fázové srovnávací ochrany.

4.2.1 Nadproudové ochrany

Princip těchto ochrany je dán tím, že při přetížení nebo zkratu se zvětšuje proud procházející chráněným objektem. Tento proud ochrana měří a pokud dojde k překročení nastavené hodnoty dává povel k vypnutí. Z hlediska jejich působení v závislosti na nadproudu a času rozeznáváme čtyři typy nadproudových ochrany:

4.2.1.1 Nezávislá nadproudová ochrana

Působí v čase t_k při dosažení proudu I_k . Při $I > I_k$ doba působení již nezávisí na velikosti proudu I a je konstantní. Nejčastěji se používají v radiálních sítích vysokého napětí, kde je řada úseku spojena v sérii.

4.2.1.2 Závislá nadproudová ochrana

Její charakteristika je definována jako:

$$t = \frac{K}{(I - I_\infty)^n} \quad \text{pro } I > I_\infty \quad (1.1)$$

$$t = \infty \quad \text{pro } I \leq I_\infty$$

Výhoda závislé ochrany spočívá v tom, že zkracuje dobu vypnutí podle velikosti proudu I .

Vypínací čas u závislých ochrany podle IEC 255 závisí na proudu podle vztahu:

$$t = \frac{K}{\left(\frac{I}{I_{\infty}}\right)^{\alpha} - 1} T_p \quad (1.2)$$

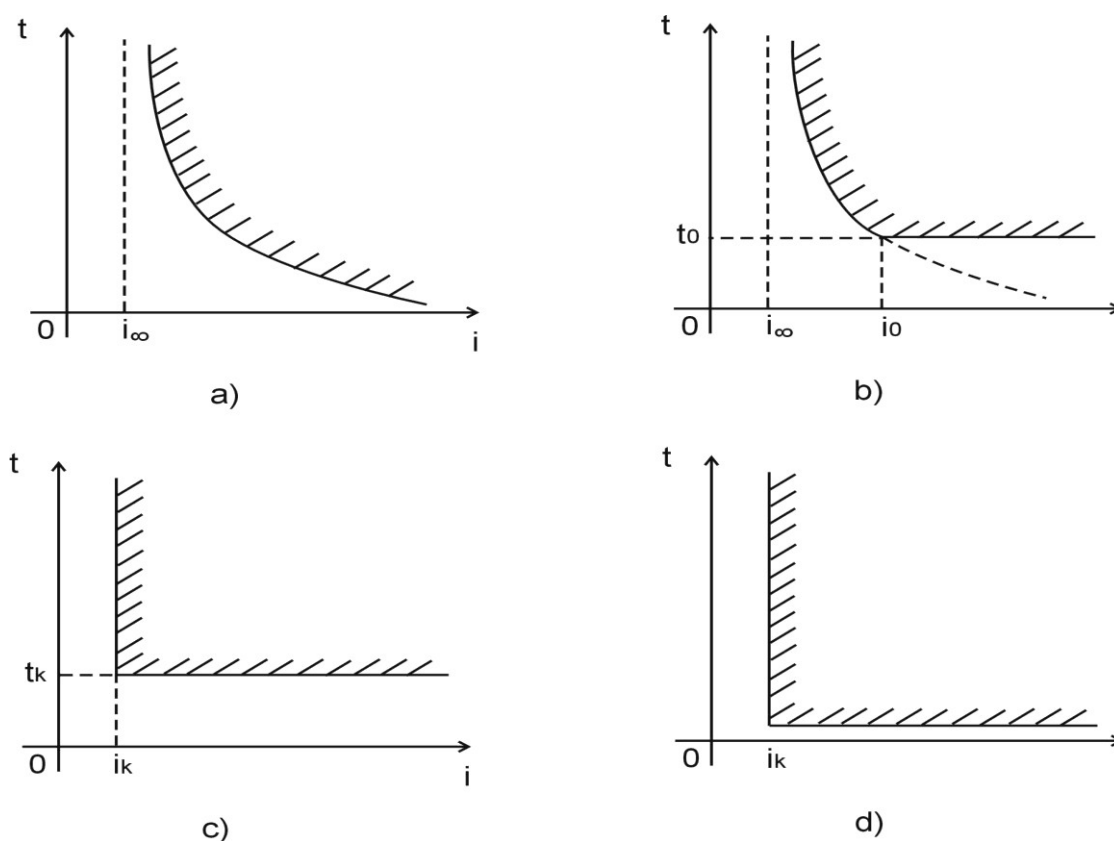
kde t je teoretický čas působení
 K je konstanta charakterizující relé (posun charakteristiky)
 T_p je časový násobitel
 I je poruchový proud
 I_{∞} je nastavený rozběhový proud
 α je index charakterizující algebraickou funkcí (strmost charakteristiky)

4.2.1.3 Polozávislá nadproudová ochrana

Má charakteristiku působení definovanou stejně jako závislá ochrana pouze do velikosti proudu I_0 . Pro větší proudy $I > I_0$ již má konstantní dobu působení.

4.2.1.4 Mžiková nadproudová ochrana

Působí při překročení nastaveného proudu I_k bez zpoždění. Zpoždění je prakticky dáno pouze vlastním časem, který bývá u moderních ochran do 10 ms.



Obr. 7 - Charakteristiky nadproudových ochran

a) závislá nadproudová ochrana; b) polozávislá nadproudová ochrana; c) nezávislá nadproudová ochrana;
d) mžiková nadproudová ochrana

4.3 Ochrany transformátoru

[4]

Transformátory jsou cenově jedním z nejdražších prvků soustavy. Je proto nutné je náležitě chránit v případě poruchy a to jak v případě vnějších zkratů, přetížení a vnitřních zkratů.

Rozdílová ochrana transformátoru

Chrání transformátor před vnitřními zkraty mezi vinutími. Od ostatních rozdílových ochran se liší těmito znaky:

- možnost tří vývodů u strojů se třemi vinutími proti dvěma u generátoru
- možnost připojení k objektu s nestejnou konfigurací primární a sekundární strany
- blokování při zapínacím nárazu transformátoru

Plynové relé

Nazývá se také Buchholzovo relé a používá se u transformátorů olejových. Zapojuje se do potrubí mezi nádobu transformátoru a konzervátorem. Při vnitřním zkratu transformátoru nastává vlivem tepla oblouku nebo ohřátého vodiče rozklad a destilace oleje. Z oleje se uvolňují rozkladné plyny, na které relé reaguje signalizací nebo při rychlém vývinu plynů vypíná transformátor.

Nádobová ochrana

Nazývá se též zemní ochrana kostrová. Transformátor je umístěn na izolační podložce, kostra transformátoru je spojena se zemnicí soustavou transformovny vodičem, který prochází průvlekovým transformátorem proudu. Při přeskočení na průchodkách nebo na vinutí nádobu protéká proud přes průvlekový transformátor do země a proudová ochrana provádí vypnutí. Všechny kabely pomocných obvodů musí procházet přes průvlekový transformátor proudu.

5. Varianty provozu rozvodu

Varianty propojení rozvodu závodu vycházejí z provozních stavů výrobní technologie za normálního provozu, mimokampaňového provozu a při mimořádných stavech, jako je výpadek napájecí linky. Výpočtové varianty jsou modelem skutečných stavů.

5.1 Varianta č. 1

Základní varianta

Rozvodna R1- 22 kV je napájena přívodní linkou vn 20, jsou zapojeny transformátory T1, T2, T3, T4. Rozvodna R2- 6 kV je podélně rozpojena spojkou přípojníc vypínačem v k.č. 6 a 7, vyrábějí oba turboalternátory TG1 a TG2 a jsou v provozu asynchronní motory o uvedených výkonech.

5.2 Varianta č. 2

Mimokampaňový provoz

Rozvodna R1- 22 kV je napájena přívodní linkou vn 20, je zapojen transformátor T4. Podélná spojka přípojníc v rozvodně R2- 6 kV je sepnuta vypínačem v k.č. 6 a 7, turboalternátory TG1 a TG2 jsou odstaveny, asynchronní motory o uvedených výkonech jsou v provozu pouze v omezeném počtu – viz Varianta 2 dle Tab. č 7..

5.3 Varianta č. 3

Provoz při výpadku distribuční sítě

Rozvodna R1- 22 kV je bez napětí na přívodních linkách, je zapojen transformátor T4. Podélná spojka přípojníc v rozvodně R2- 6 kV je sepnuta vypínačem v k.č. 6 a 7, turboalternátory TG1 a TG2 vyrábějí při jmenovitém výkonu, asynchronní motory o uvedených výkonech jsou v provozu pouze v omezeném počtu – viz Varianta 3 dle Tab. č 7.

6. Vstupní data pro výpočet

Pro určení maximálních a minimálních zkratových proudů a následně pro kontrolu nastavení zkratových ochran je potřeba stanovit jmenovité hodnoty všech prvků vstupujících do výpočtů, tzn. generátorů, reaktorů, transformátorů, kabelů a přispívajících asynchronních motorů.

6.1 Zkratové příspěvky distribuční sítě

| Rozvodna | $I_{k"3\max}$ (kA) | $I_{k"3\min}$ (kA) |
|----------|-----------------------|-----------------------|
| VN 20 | 5,78 | 3,45 |
| VN 15 | 5,78 | 3,45 |

Tab. 1 - Zkratové příspěvky distribuční sítě

6.2 Parametry generátorů

| číslo | označení | U_n (kV) | S_n (MVA) | x_d'' (%) | $\cos \varphi_i$ (-) |
|-------|----------|---------------|----------------|----------------|-------------------------|
| 1 | TG1 | 6,3 | 2,5 | 14,8 | 0,8 |
| 2 | TG2 | 6,3 | 1,6 | 14,6 | 0,8 |

Tab. 2 - Parametry generátorů

6.3 Parametry transformátorů

| číslo | označení | S_n (MVA) | $U_n \text{ pri}$ (kV) | $U_n \text{ sek}$ (kV) | u_k (%) |
|-------|----------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| 1 | T1 | 4 | 22 | 6,3 | 5,98 |
| 2 | T2 | 4 | 22 | 6,3 | 5,95 |
| 3 | T3 | 1,6 | 22 | 6,3 | 6,53 |
| 4 | T4 | 1,6 | 22 | 0,4 | 6,21 |
| 5 | T5 | 1 | 22 | 0,4 | 6,21 |
| 6 | T10 | 0,63 | 6 | 0,4 | 6,01 |
| 7 | T20 | 1 | 6 | 0,4 | 5,71 |
| 8 | T21 | 1 | 6 | 0,4 | 5,71 |
| 9 | T22 | 0,2 | 6 | 0,4 | 5,85 |
| 10 | T23 | 0,63 | 6 | 0,4 | 5,9 |
| 11 | T24 | 1 | 6 | 0,4 | 5,78 |
| 12 | T25 | 0,2 | 6 | 0,4 | 5,85 |

Tab. 3 - Parametry transformátorů

6.4 Parametry reaktorů

| číslo | označení | UnR (kV) | InR (A) | ukR (%) |
|-------|----------|-------------|------------|------------|
| 1 | Re1 | 6 | 500 | 5 |
| 2 | Re2 | 6 | 400 | 5 |

Tab. 4 - Parametry reaktorů

6.5 Parametry kabelů

| číslo | Směr začátek konec | | Typ kabelu | Počet kabelů | S (sqmm) | L (m) | Un (kV) |
|-------|-------------------------|---------|---------------|-----------------|-------------|----------|------------|
| W1 | T3 | DS0101 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 860 | 6 |
| W2 | T1 | R20101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 65 | 6 |
| W3 | T4 | R20104 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 65 | 6 |
| W4 | T2 | R20112 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 60 | 6 |
| W5 | R20103 | Re1 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 20 | 6 |
| W18 | Re1 | KT0101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 230 | 6 |
| W6 | TG1 | R20105 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 200 | 6 |
| W7 | TG2 | R20108 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 180 | 6 |
| W8 | R20109 | Re2 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 20 | 6 |
| W19 | Re2 | OS10101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 210 | 6 |
| W9 | R20110 | KT0112 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 180 | 6 |
| W10 | DS0107 | OS10102 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 950 | 6 |
| W11 | DS0106 | KT0116 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 800 | 6 |
| W12 | KT0113 | OS10119 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 240 | 6 |
| W13 | KT0114 | CV0101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 250 | 6 |
| W14 | KT0115 | EX0101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 160 | 6 |
| W15 | EX0109 | CV0110 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 110 | 6 |
| W16 | OS10117 | ML0101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 150 | 6 |
| W17 | OS10116 | OS20101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 90 | 6 |
| W20 | R1 | T1 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 50 | 22 |
| W21 | R1 | T2 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 45 | 22 |
| W22 | R1 | T4 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 20 | 22 |
| W23 | R1 | T5 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 20 | 22 |
| W24 | R1 | T3 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 20 | 22 |

Tab. 5 - Parametry kabelů

6.6 Tabulkové hodnoty instalovaných kabelů

| Typ kabelu | S (sqmm) | R (Ohm/km) | X (Ohm/km) |
|------------|----------|------------|------------|
| AXEKCY | 240 | 0,125 | 0,113 |
| 6-AYKCY | 120 | 0,253 | 0,117 |
| 6-AYKCY | 150 | 0,206 | 0,113 |
| 6-AYKCY | 240 | 0,125 | 0,105 |
| 22-ANKTOPV | 240 | 0,125 | 0,113 |

Tab. 6 - Tabulkové hodnoty instalovaných kabelů

6.7 Parametry asynchronních motorů

| Číslo | Provoz | označení | P _n (kW) | U _n (kV) | I _n (A) | I _z (x I _n) | Varianta 1 | Varianta 2 | Varianta 3 |
|-------|--------|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|------------|------------|------------|
| 1 | DS | čerpadlo plavící 1 | 200 | 6 | 23,5 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 2 | DS | čerpadlo plavící 2 | 200 | 6 | 23,5 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 3 | KT | napáječka 1 | 185 | 6 | 21,7 | 6 | zap | zap | zap |
| 4 | KT | napáječka 2 | 185 | 6 | 21,7 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 5 | KT | ventilátor při K1 | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | vyp | zap |
| 6 | KT | ventilátor sek K1 | 355 | 6 | 39,5 | 6 | zap | vyp | zap |
| 7 | KT | ventilátor při K2 | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | vyp | zap |
| 8 | KT | ventilátor sek K2 | 355 | 6 | 39,5 | 6 | zap | vyp | zap |
| 9 | KT | ventilátor při K3 | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | vyp | zap |
| 10 | KT | ventilátor sek K3 | 355 | 6 | 39,5 | 6 | zap | vyp | zap |
| 11 | KT | ventilátor odtah. K4 | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | zap | zap |
| 12 | EX | extraktor 1 | 160 | 6 | 19,7 | 7 | zap | vyp | zap |
| 13 | EX | extraktor 2 | 160 | 6 | 19,7 | 7 | zap | vyp | vyp |
| 14 | EX | maguin 1 | 250 | 6 | 29 | 7 | zap | vyp | zap |
| 15 | EX | maguin 2 | 250 | 6 | 29 | 7 | zap | vyp | vyp |
| 16 | EX | pračka | 160 | 6 | 19,7 | 7 | zap | vyp | zap |
| 17 | CV | čerpadlo barom. 1 | 200 | 6 | 23,5 | 6 | zap | vyp | zap |
| 18 | CV | čerpadlo barom. 2 | 200 | 6 | 23,5 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 19 | CV | ventilátor věže 1 | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | vyp | zap |
| 20 | CV | ventilátor věže 2 | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 21 | CV | ventilátor věže 3 | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 22 | CV | ventilátor věže 4 | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 23 | ML | stolice mlecí 1 | 315 | 6 | 36,3 | 7 | zap | zap | zap |
| 24 | ML | stolice mlecí 2 | 315 | 6 | 36,3 | 7 | zap | zap | zap |
| 25 | ML | stolice mlecí 3 | 185 | 6 | 21,7 | 7 | zap | zap | zap |
| 26 | OS1 | odstředivka A1 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | zap |

| | | | | | | | | | |
|----|-----|----------------|-----|---|------|---|-----|-----|-----|
| 27 | OS1 | odstředivka A2 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | zap |
| 28 | OS1 | odstředivka A3 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 29 | OS1 | odstředivka A4 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 30 | OS1 | odstředivka B1 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | zap |
| 31 | OS1 | odstředivka B2 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 32 | OS1 | odstředivka B3 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 33 | OS1 | odstředivka B4 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 34 | OS1 | ventilátor A | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | vyp | zap |
| 35 | OS1 | ventilátor B | 160 | 6 | 19,7 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 36 | OS2 | odstředivka C1 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | zap |
| 37 | OS2 | odstředivka C2 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 38 | OS2 | odstředivka C3 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | vyp |
| 39 | OS2 | odstředivka C4 | 250 | 6 | 29 | 6 | zap | vyp | vyp |

Tab. 7 - Parametry asynchronních motorů

7. Rozvodny - popisy vývodů

| Rozvodna | Kobka č. | Vývod pro | Kabel ozn. | Kabel typ | Počet kabelů | S (sqmm) | L (m) | P (kW) |
|----------|-------------|--------------------|---------------|--------------|-----------------|-------------|----------|-----------|
| R2 | 1 | přívod T1 | W2 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 65 | - |
| R2 | 2 | měření | - | - | - | - | - | - |
| R2 | 3 | vývod do Re1 | W5 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 20 | - |
| R2 | 4 | přívod z T4 | W3 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 65 | - |
| R2 | 5 | vývod TG1 | W6 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 200 | - |
| R2 | 6 | spojka | - | - | - | - | - | - |
| R2 | 7 | spojka | - | - | - | - | - | - |
| R2 | 8 | vývod TG2 | W7 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 180 | - |
| R2 | 9 | vývod do Re2 | W8 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 20 | - |
| R2 | 10 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| R2 | 11 | měření | - | - | - | - | - | - |
| R2 | 12 | přívod z T2 | W4 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 60 | - |
| DS | 1 | přívod z T3 | W1 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 860 | - |
| DS | 2 | vývod do T10 | W9 | 6-AYKCY | 1 | 150 | 30 | - |
| DS | 3 | čerpadlo plavicí 1 | W10 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 50 | 200 |
| DS | 4 | čerpadlo plavicí 2 | W11 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 200 |
| DS | 5 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| DS | 6 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| DS | 7 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| KT | 1 | přívod z Re1 | W18 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 230 | - |
| KT | 2 | vývod do T20 | W12 | 6-AYKCY | 1 | 150 | 40 | - |
| KT | 3 | napáječka 1 | W20 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 70 | 185 |
| KT | 4 | napáječka 2 | W21 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 185 |
| KT | 5 | ventilátor pri K1 | W22 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 40 | 160 |
| KT | 6 | ventilátor sek K1 | W23 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 355 |

| | | | | | | | | |
|-----|----|----------------------|-----|---------|---|-----|-----|-----|
| KT | 7 | ventilátor pri K2 | W24 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 40 | 160 |
| KT | 8 | ventilátor sek K2 | W25 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 355 |
| KT | 9 | ventilátor pri K3 | W26 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 40 | 160 |
| KT | 10 | ventilátor sek K3 | W27 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 355 |
| KT | 11 | ventilátor odtah. K4 | W28 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 50 | 160 |
| KT | 12 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| KT | 13 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| KT | 14 | vývod do CV | W13 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 250 | - |
| KT | 15 | vývod do EX | W14 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 160 | - |
| KT | 16 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| EX | 1 | přívod z KT | W14 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 160 | - |
| EX | 2 | vývod do T21 | W29 | 6-AYKCY | 1 | 150 | 40 | - |
| EX | 3 | extraktor 1 | W30 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 50 | 160 |
| EX | 4 | extraktor 2 | W31 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 70 | 160 |
| EX | 5 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| EX | 6 | maguin 1 | W32 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 250 |
| EX | 7 | maguin 2 | W33 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 250 |
| EX | 8 | pračka | W34 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 50 | 160 |
| EX | 9 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| CV | 1 | přívod z KT | W13 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 250 | - |
| CV | 2 | vývod do T22 | W35 | 6-AYKCY | 1 | 150 | 35 | - |
| CV | 3 | čerpadlo barom. 1 | W36 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 50 | 200 |
| CV | 4 | čerpadlo barom. 2 | W37 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 50 | 200 |
| CV | 5 | ventilátor věže 1 | W38 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 70 | 160 |
| CV | 6 | ventilátor věže 2 | W39 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 70 | 160 |
| CV | 7 | ventilátor věže 3 | W40 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 80 | 160 |
| CV | 8 | ventilátor věže 4 | W41 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 80 | 160 |
| CV | 9 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| CV | 10 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| ML | 1 | přívod z OS1 | W16 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 150 | - |
| ML | 2 | vývod do T23 | W42 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 30 | - |
| ML | 3 | stolice mlecí 1 | W43 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 50 | 315 |
| ML | 4 | stolice mlecí 2 | W44 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 315 |
| ML | 5 | stolice mlecí 3 | W45 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 70 | 185 |
| ML | 6 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| ML | 7 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| OS1 | 1 | přívod z Re2 | W19 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 210 | - |
| OS1 | 2 | vývod do T24 | W46 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 40 | - |
| OS1 | 3 | odstředivka A1 | W47 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 40 | 250 |
| OS1 | 4 | odstředivka A2 | W48 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 50 | 250 |
| OS1 | 5 | odstředivka A3 | W49 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 250 |
| OS1 | 6 | odstředivka A4 | W50 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 70 | 250 |
| OS1 | 7 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| OS1 | 8 | odstředivka B1 | W51 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 70 | 250 |
| OS1 | 9 | odstředivka B2 | W52 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 80 | 250 |
| OS1 | 10 | odstředivka B3 | W53 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 90 | 250 |
| OS1 | 11 | odstředivka B4 | W54 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 100 | 250 |

| | | | | | | | | |
|-----|----|-----------------------|-----|---------|---|-----|-----|-----|
| OS1 | 12 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| OS1 | 13 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| OS1 | 14 | ventilátor chlazení A | W55 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 50 | 160 |
| OS1 | 15 | ventilátor chlazení B | W56 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 60 | 160 |
| OS1 | 16 | vývod do OS2 | W17 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 90 | - |
| OS1 | 17 | vývod do ML | W16 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 150 | - |
| OS1 | 18 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| OS1 | 19 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| OS2 | 1 | přívod z OS1 | W17 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 90 | - |
| OS2 | 2 | vývod do T25 | W57 | 6-AYKCY | 1 | 150 | 50 | - |
| OS2 | 3 | odstředivka C1 | W58 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 90 | 250 |
| OS2 | 4 | odstředivka C2 | W59 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 100 | 250 |
| OS2 | 5 | rezerva | - | - | - | - | - | - |
| OS2 | 6 | odstředivka C3 | W60 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 120 | 250 |
| OS2 | 7 | odstředivka C4 | W61 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 130 | 250 |
| OS2 | 8 | rezerva | - | - | - | - | - | - |

Tab. 8 - Rozvodny - popisy vývodů

8. Výpočet zkratových poměrů

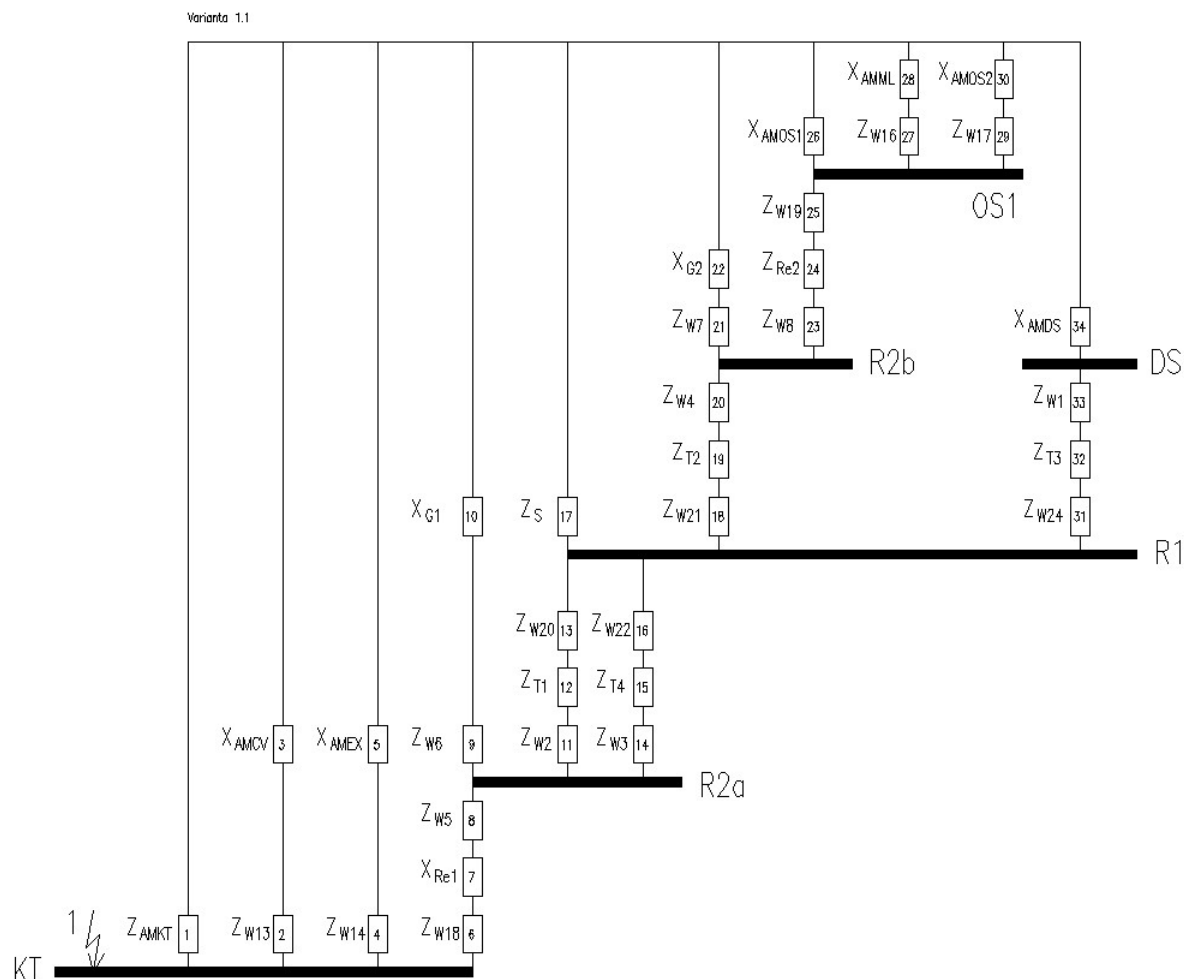
Výpočet zkratových poměru je proveden u obou provozních variant napájení rozveden, výsledky jsou uvedeny v přehledných tabulkách.

V prvním případě jsou počítány maximální zkratové proudy s příspěvkem vlivů asynchronních motorů a tyto hodnoty jsou dále využity pro kontrolu zkratové odolnosti rozveden a nastavení vypínacích časů zkratových ochran.

Druhý případ je řešen s uvažováním minimálních zkratových výkonů z nadřazených rozveden a bez vlivů asynchronních motorů. Uvedené výsledky jsou použity pro kontrolu nastavení nadproudových článků zkratových ochran, které musí vypnout již při nejmenším možném zkratovém proudu a spolehlivě chránit zařízení před účinky zkratu.

Náhradní schémata pro výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů včetně naznačených míst zkratů jsou podle řešených variant uvedena v přílohách č. 2 až 8 a č. 10 až 15.

8.1 Příklad výpočtu maximálních hodnot – Varianta č. 1 (zkrat v místě KT)



Obr. 8 Náhradní schéma pro výpočet maximálního zkratového proudu

Náhradní impedance pro výpočet maximálního počátečního rázového zkratového proudu pro zkrat v místě KT je sérioparalelní kombinací jednotlivých rezistencí a reaktancí prvků zkratového obvodu.

8.1.1 Výpočet sousledných parametrů zkratového obvodu

Impedance generátoru dle vztahu (3.5) a (3.6):

$$X_{dG1}'' = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{14,8 \cdot 6^2}{100 \cdot 2,5} = 2,131 \, \Omega \quad R_{G1} = 0,07 X_{dG1}'' = 0,1492 \, \Omega$$

$$Z_{G1} = R_{G1} + jX_{dG1}'' = 0,1492 + j2,131 \, \Omega$$

$$X_{dG2}'' = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{14,6 \cdot 6^2}{100 \cdot 1,6} = 3,285 \, \Omega \quad R_{G1} = 0,07 X_{dG2}'' = 0,230 \, \Omega$$

$$Z_{G2} = R_{G2} + jX_{dG2}'' = 0,230 + j3,285 \, \Omega$$

Impedance sítě a přepočítání na posuzovanou hladinu dle vztahů (3.2) a (3.27):

$$Z_S = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} = \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 5,78} = j2,417 \, \Omega$$

$$Z_{S(6kV)} = Z_S \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = j2,417 \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = j0,1798 \, \Omega$$

I_k'' – počáteční rázový zkratový proud na vstupu do trafostanice (dle ČEZ Distribuce a.s.)

Impedance reaktorů dle vztahu (3.9):

$$Z_{Re1} = \frac{10 \cdot u_{kR} \cdot U_{nR}}{\sqrt{3} \cdot I_{nR}} = \frac{10 \cdot 5 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 500} = j0,3464 \, \Omega$$

$$Z_{Re2} = \frac{10 \cdot u_{kR} \cdot U_{nR}}{\sqrt{3} \cdot I_{nR}} = \frac{10 \cdot 5 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 400} = j0,4330 \, \Omega$$

Impedance kabelů dle vztahu (3.21) a (3.22):

$$R_{W1} = R_{W1} \cdot l = \frac{0,125 \cdot 0,86}{1} = 1,075 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$X_{W1} = X_{W1} \cdot l = \frac{0,105 \cdot 0,86}{1} = 9,03 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$Z_{W1} = 1,075 \cdot 10^{-1} + j9,03 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$R_{W2} = R_{W3} = R_{W2} \cdot l = \frac{0,125 \cdot 0,065}{1} = 8,125 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{W2} = X_{W3} = X_{W2} \cdot l = \frac{0,105 \cdot 0,065}{1} = 6,825 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{W2} = Z_{W3} = 8,125 \cdot 10^{-3} + j6,825 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{W4} = R_{W4} \cdot l = \frac{0,125 \cdot 0,06}{1} = 7,5 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{W4} = X_{W4} \cdot l = \frac{0,105 \cdot 0,06}{1} = 6,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{W4} = 7,5 \cdot 10^{-3} + j6,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Obdobným způsobem jsou vypočítány hodnoty pro další kabely podle jejich parametrů:

| | | | |
|-----|---|--------------------|-----|
| W1 | Z | 0,21758+0,10062j | ohm |
| W2 | Z | 0,008125+0,006825j | ohm |
| W3 | Z | 0,016445+0,007605j | ohm |
| W4 | Z | 0,0075+0,0063j | ohm |
| W5 | Z | 0,0025+0,0021j | ohm |
| W6 | Z | 0,0412+0,0226j | ohm |
| W7 | Z | 0,03708+0,02034j | ohm |
| W8 | Z | 0,0025+0,0021j | ohm |
| W13 | Z | 0,06325+0,02925j | ohm |
| W14 | Z | 0,04048+0,01872j | ohm |
| W16 | Z | 0,0309+0,01695j | ohm |
| W17 | Z | 0,02277+0,01053j | ohm |
| W18 | Z | 0,02875+0,02415j | ohm |
| W19 | Z | 0,02625+0,02205j | ohm |
| W20 | Z | 0,00625+0,00565j | ohm |
| W21 | Z | 0,005625+0,005085j | ohm |
| W22 | Z | 0,0025+0,00226j | ohm |
| W24 | Z | 0,0025+0,00226j | ohm |

Tab.9 – Impedance kabelů

Impedance asynchronních motorů dle vztahu (3.10):

$$Z_{AMKT} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cdot \cos(\varphi)}} = \frac{6^2}{6 \cdot \frac{2,075}{0,95 \cdot 0,82}} = j2,252 \Omega$$

$\cos\varphi=0,82 \quad \eta_{AM}=0,95$

$$Z_{AMEX} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cdot \cos(\varphi)}} = \frac{6^2}{6 \cdot \frac{0,98}{0,96 \cdot 0,83}} = j4,181 \Omega$$

$\cos\varphi=0,82 \quad \eta_{AM}=0,96$

$$Z_{AMCV} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cdot \cos(\varphi)}} = \frac{6^2}{6 \cdot \frac{1,04}{0,95 \cdot 0,82}} = j4,494 \Omega$$

$\cos\varphi=0,82 \quad \eta_{AM}=0,95$

$$Z_{AMDS} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cdot \cos(\varphi)}} = \frac{6^2}{6 \cdot \frac{0,4}{0,95 \cdot 0,82}} = j11,69 \Omega$$

$\cos\varphi=0,82 \quad \eta_{AM}=0,95$

$$Z_{AMML} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cdot \cos(\varphi)}} = \frac{6^2}{7 \cdot \frac{0,815}{0,94 \cdot 0,82}} = j4,864 \Omega$$

$\cos\varphi=0,82 \quad \eta_{AM}=0,94$

$$Z_{AMOS1} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cdot \cos(\varphi)}} = \frac{6^2}{6 \cdot \frac{2,32}{0,95 \cdot 0,82}} = j2,015 \Omega$$

$\cos\varphi=0,82 \quad \eta_{AM}=0,95$

$$Z_{AMOS2} = \frac{U_{nAM}^2}{I_Z \cdot \frac{P_{nAM}}{\eta_{AM} \cdot \cos(\varphi)}} = \frac{6^2}{6 \cdot \frac{1,0}{0,95 \cdot 0,82}} = j4,674 \Omega$$

$\cos\varphi=0,82 \quad \eta_{AM}=0,95$

Celková impedance zkratového obvodu:

$$Z_C = 1,16 \cdot 10^{-2} + j4,418 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$|Z_C| = \sqrt{(1,16 \cdot 10^{-2})^2 + (4,418 \cdot 10^{-1})^2} = 4,421 \cdot 10^{-1} \Omega$$

8.1.2 Výpočet maximálního počátečního rázového zkratového proudu

Počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu dle vztahu (3.29):

$$I''_{k3 \max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_C|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 4,421 \cdot 10^{-1}} = 8,6 \text{ kA}$$

Počáteční rázový zkratový proud při dvoufázovém zkratu dle vztahu (3.30):

$$I''_{k2 \max} = I''_{k3 \max} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 8,619 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 7,5 \text{ kA}$$

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' :

$$S''_{k \max} = \sqrt{3} \cdot I''_{k3 \max} \cdot U_n = \sqrt{3} \cdot 8,619 \cdot 6 = 89,6 \text{ MVA}$$

8.1.3 Výpočet nárazového zkratového proudu i_p

Nárazový zkratový proud i_p namáhá zařízení elektrodynamickými silami. Definován je jako vrcholová hodnota první amplitudy zkratového proudu při největší možné stejnosměrné složce.

Nárazový zkratový proud i_p dle vztahu (3.32):

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 1,899 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,619 = 23,2 \text{ kA}$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}}$$

Součinitel nárazového zkratového proudu κ je určen podle [7] na základě známého poměru R/X .

Příklad výpočtu dle vztahu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{1,598}{44,18}} = 1,899$$

Výpočet i_p je proveden za účelem posouzení odolnosti rozvodu z hlediska dynamického účinku zkratového proudu. Ta je dána výrobcem zařízení a musí vyhovět podmínce,

$$I_{dyn} \geq i_p$$

kde I_{dyn} je maximální hodnota proudu, který zařízení přenesení bez poškození vzniklého působícími vlivem elektrodynamickými silami.

Přehled výsledků pro variantu č. 1

| Varianta-max. | | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 |
|----------------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Zkrat v místě | | KT | DS | OS1 | R2a | R2b | R1 |
| Zc | ohm | 4,421E-01 | 8,015E-01 | 5,313E-01 | 2,899E-01 | 4,196E-01 | 1,884E+00 |
| I''k3max | kA | 8,619E+00 | 4,754E+00 | 7,172E+00 | 1,314E+01 | 9,080E+00 | 7,415E+00 |
| S''k3max | MVA | 8,958E+01 | 4,940E+01 | 7,453E+01 | 1,366E+02 | 9,436E+01 | 2,825E+02 |
| I''k2max | kA | 7,465E+00 | 4,117E+00 | 6,211E+00 | 1,138E+01 | 7,864E+00 | 6,422E+00 |
| ip | kA | 2,315E+01 | 1,002E+01 | 1,964E+01 | 3,574E+01 | 2,483E+01 | 2,072E+01 |
| kappa | - | 1,899E+00 | 1,490E+00 | 1,936E+00 | 1,923E+00 | 1,934E+00 | 1,976E+00 |
| Un | kV | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 22 |

Tabulka č. 10 – výsledky výpočtů pro variantu č. 1

Přehled výsledků pro variantu č. 2

| Varianta-max. | | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | |
|----------------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| Zkrat v místě | | KT | DS | OS1 | R2 | R1 | |
| Zc | ohm | 9,422E-01 | 8,884E-01 | 9,261E-01 | 6,110E-01 | 2,322E+00 | |
| I''k3max | kA | 4,044E+00 | 4,289E+00 | 4,114E+00 | 6,236E+00 | 6,016E+00 | |
| S''k3max | MVA | 4,203E+01 | 4,458E+01 | 4,276E+01 | 6,481E+01 | 2,292E+02 | |
| I''k2max | kA | 3,502E+00 | 3,715E+00 | 3,563E+00 | 5,401E+00 | 5,210E+00 | |
| ip | kA | 1,078E+01 | 8,971E+00 | 1,124E+01 | 1,712E+01 | 1,700E+01 | |
| kappa | - | 1,886E+00 | 1,479E+00 | 1,932E+00 | 1,941E+00 | 1,999E+00 | |
| Un | kV | 6 | 6 | 6 | 6 | 22 | |

Tabulka č. 11 – výsledky výpočtů pro variantu č. 2

Přehled výsledků pro variantu č. 3

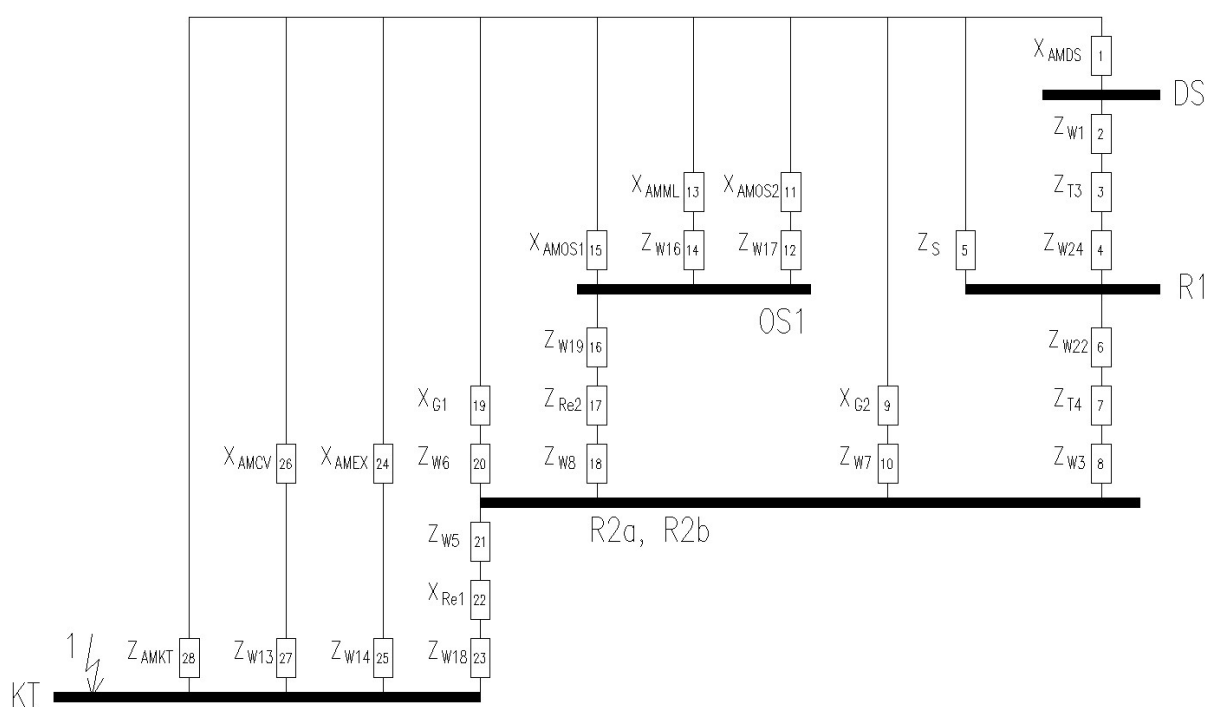
| Varianta-max. | | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | |
|----------------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| Zkrat v místě | | KT | DS | OS1 | R2 | R1 | |
| Zc | ohm | 6,898E-01 | 1,874E+00 | 9,285E-01 | 6,412E-01 | 1,596E+01 | |
| I''k3max | kA | 5,524E+00 | 2,033E+00 | 4,104E+00 | 5,943E+00 | 8,753E-01 | |
| S''k3max | MVA | 5,741E+01 | 2,113E+01 | 4,265E+01 | 6,176E+01 | 3,335E+01 | |
| I''k2max | kA | 4,784E+00 | 2,113E+01 | 3,554E+00 | 5,147E+00 | 7,580E-01 | |
| ip | kA | 1,479E+01 | 4,767E+00 | 1,087E+01 | 1,565E+01 | 2,334E+00 | |
| kappa | - | 1,893E+00 | 1,657E+00 | 1,873E+00 | 1,861E+00 | 1,885E+00 | |
| Un | kV | 6 | 6 | 6 | 6 | 22 | |

Tabulka č. 12 – výsledky výpočtů pro variantu č. 3

Z uvedených tabulek vyplývá, že hodnota nárazového zkratového proudu i_p vychází největší u provozní varianty č. 1. Žádný z výsledků výpočtů není větší než výrobcem uváděná hodnota $I_{dyn} = 63 \text{ kA}$, čímž je vyhověno podmínce dle vztahu (7.3). Zároveň je ověřeno, že není překročena zkratová odolnost přípojnic 300 MVA.

Maximální počáteční rázové zkratové proudy dosáhly své největší hodnoty u provozní varianty č. 1, tyto výsledky jsou dále použity pro kontrolu nastavení maximálních vypínacích časů ochran.

8.2 Příklad výpočtu minimálních hodnot – Varianta č. 1 (zkrat v místě KT)



Obr. 9. Náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu

Pro výpočet náhradní impedance zkratového obvodu je uvažováno s příspěvkem minimálních rázových zkratových proudů nadřazených rozveden a bez příspěvku asynchronních motorů. Náhradní impedance pro výpočet I''_k v místě zkratu je pak sérioparalelní kombinací jednotlivých rezistencí a reaktancí prvků zkratového obvodu.

8.2.1 Výpočet sousledných parametrů zkratového obvodu

Impedance generátoru dle vztahu (3.5) a (3.6):

$$X''_{dG1} = \frac{x''_d \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{14,8 \cdot 6^2}{100 \cdot 2,5} = 2,131 \, \Omega \quad R_{G1} = 0,07 X''_{dG1} = 0,1492 \, \Omega$$

$$Z_{G1} = R_{G1} + jX''_{dG1} = 0,1492 + j2,131 \, \Omega$$

$$X''_{dG2} = \frac{x''_d \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{14,6 \cdot 6^2}{100 \cdot 1,6} = 3,285 \, \Omega \quad R_{G1} = 0,07 X''_{dG2} = 0,230 \, \Omega$$

$$Z_{G2} = R_{G2} + jX''_{dG2} = 0,230 + j3,285 \, \Omega$$

Impedance sítě a přepočítání na posuzovanou hladinu dle vztahů (3.2) a (3.27):

$$Z_S = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} = \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 5,78} = j2,417 \, \Omega$$

$$Z_{S(6kV)} = Z_S \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = j2,417 \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = j0,1798 \, \Omega$$

Impedance kabelů dle vztahu (3.21) a (3.22):

Impedance kabelů dle vztahu (3.21) a (3.22):

$$R_{W1} = R_{W1} \cdot l = \frac{0,125 \cdot 0,86}{1} = 1,075 \cdot 10^{-1} \, \Omega$$

$$X_{W1} = X_{W1} \cdot l = \frac{0,105 \cdot 0,86}{1} = 9,03 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$Z_{W1} = 1,075 \cdot 10^{-1} + j9,03 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$R_{W2} = R_{W3} = R_{W2} \cdot l = \frac{0,125 \cdot 0,065}{1} = 8,125 \cdot 10^{-3} \, \Omega$$

$$X_{W2} = X_{W3} = X_{W2} \cdot l = \frac{0,105 \cdot 0,065}{1} = 6,825 \cdot 10^{-3} \, \Omega$$

$$Z_{W2} = Z_{W3} = 8,125 \cdot 10^{-3} + j6,825 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{W4} = R_{W4} \cdot l = \frac{0,125 \cdot 0,06}{1} = 7,5 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{W4} = X_{W4} \cdot l = \frac{0,105 \cdot 0,06}{1} = 6,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{W4} = 7,5 \cdot 10^{-3} + j6,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Obdobným způsobem jsou vypočítány hodnoty pro další kabely podle jejich parametrů a jsou uvedeny v tabulce č. 9.

Celková impedance zkratového obvodu:

$$Z_C = 4,406 \cdot 10^{-2} + j8,126 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$|Z_C| = \sqrt{(4,406 \cdot 10^{-2})^2 + (8,126 \cdot 10^{-1})^2} = 0,8138 \Omega$$

8.2.2 Výpočet minimálního počátečního rázového zkratového proudu

Počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu dle vztahu (3.29):

$$I''_{k3\min} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_C|} = \frac{1,6}{\sqrt{3} \cdot 0,8138} = 4,7 \text{ kA}$$

Počáteční rázový zkratový proud při dvoufázovém zkratu dle vztahu (3.30):

$$I''_{k2\min} = I''_{k3\min} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 4,682 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 4,1 \text{ kA}$$

8.2.3 Přehled výsledků pro variantu č. 1

| Varianta-min. | | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 |
|---------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Zkrat v místě | | KT | DS | OS1 | R2a | R2b | R1 |
| Zc | ohm | 8,138E-01 | 9,649E-01 | 1,109E+00 | 4,402E-01 | 6,515E-01 | 3,371E+00 |
| I''k3min | kA | 4,682E+00 | 3,949E+00 | 3,435E+00 | 8,657E+00 | 5,849E+00 | 4,145E+00 |
| S''k3min | MVA | 4,866E+01 | 4,104E+01 | 3,570E+01 | 8,997E+01 | 6,079E+01 | 1,579E+02 |
| I''k2min | kA | 4,055E+00 | 3,420E+00 | 2,975E+00 | 7,497E+00 | 5,065E+00 | 3,589E+00 |
| ip | kA | 1,227E+01 | 8,399E+00 | 9,161E+00 | 2,348E+01 | 1,593E+01 | 1,150E+01 |
| kappa | - | 1,853E+00 | 1,504E+00 | 1,886E+00 | 1,918E+00 | 1,926E+00 | 1,963E+00 |
| Un | kV | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 22 |

Tabulka č. 13 – výsledky výpočtů pro variantu č. 1

8.2.4 Přehled výsledků pro variantu č. 2

| Varianta-min. | | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | |
|---------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Zkrat v místě | | KT | DS | OS1 | R2 | R1 | |
| Zc | ohm | 1,221E+00 | 1,013E+00 | 1,300E+00 | 8,474E-01 | 4,050E+00 | |
| I''k3min | kA | 3,121E+00 | 3,760E+00 | 2,932E+00 | 4,497E+00 | 3,450E+00 | |
| S''k3min | MVA | 3,244E+01 | 3,908E+01 | 3,047E+01 | 4,673E+01 | 1,315E+02 | |
| I''k2min | kA | 2,703E+00 | 3,256E+00 | 2,539E+00 | 3,894E+00 | 2,988E+00 | |
| ip | kA | 8,348E+00 | 8,117E+00 | 7,998E+00 | 1,236E+01 | 9,758E+00 | |
| kappa | - | 1,891E+00 | 1,526E+00 | 1,929E+00 | 1,944E+00 | 2,000E+00 | |
| Un | kV | 6 | 6 | 6 | 6 | 22 | |

Tabulka č. 14 – výsledky výpočtů pro variantu č. 2

8.2.5 Přehled výsledků pro variantu č. 3

| Varianta-min. | | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | |
|---------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Zkrat v místě | | KT | DS | OS1 | R2 | R1 | |
| Zc | ohm | 1,683E+00 | 2,562E+00 | 1,767E+00 | 1,309E+00 | 2,493E+01 | |
| I''k3min | kA | 2,264E+00 | 1,487E+00 | 2,157E+00 | 2,911E+00 | 5,604E-01 | |
| S''k3min | MVA | 2,353E+01 | 1,546E+01 | 2,241E+01 | 3,026E+01 | 2,135E+01 | |
| I''k2min | kA | 1,961E+00 | 1,288E+00 | 1,868E+00 | 2,521E+00 | 4,853E-01 | |
| ip | kA | 5,698E+00 | 3,515E+00 | 5,466E+00 | 7,323E+00 | 1,439E+00 | |
| kappa | - | 1,779E+00 | 1,671E+00 | 1,792E+00 | 1,779E+00 | 1,816E+00 | |
| Un | kV | 6 | 6 | 6 | 6 | 22 | |

Tabulka č. 15 – výsledky výpočtů pro variantu č. 3

Pro kontrolu nastavení el. ochran rozveden je nutno vycházet z minimálních zkratových výpočtů, to znamená bez respektování vlivů asynchronních motorů a při zadání dvoupólových zkratů v jednotlivých uzlech rozvodu vn.

Z výše uvedených tabulek č. 13 až 15 vyplývá, že nejmenších zkratových proudů je dosaženo při variantě č.3. Hodnoty těchto minimálních dvoufázových zkratových proudů jsou dále použity pro výpočet nastavení ochran.

9. Nastavení ochran

9.1 Výpočet pro nastavení zkratových ochran

Zkratová ochrana musí odepínat všechny zkraty, které mohou v zálohovaném úseku vzniknout. Musí být tedy splněna následující podmínka [4].

$$I_r \leq \frac{I''_{k2\min}}{k_c \cdot p} \quad (\text{kA; kA, -}) \quad (9.1)$$

I_r – rozběhový proud zkratové ochrany v primárních hodnotách

k_c – koeficient citlivosti

Příklad výpočtu pro zkrat v místě KT dle vztahu (9.1):

$$I_r \leq \frac{I''_{k2\min}}{k_c} = \frac{1,961}{1,5 \cdot p} = 1,307 \text{ kA}$$

$$I_n = 5 \text{ A} \quad p = 50 \quad I_r = 26,1 \cdot I_n$$

$$I_r \geq \frac{I_n \cdot k_b}{p_I \cdot k_p}$$

9.1.1 Přehled výsledků pro nastavení I_r

| Zkrat v místě | | KT | DS | OS1 | R2a | R2b | R1 |
|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| I''_{k2min} | kA | 1,961E+00 | 1,288E+00 | 1,868E+00 | 2,521E+00 | 2,521E+00 | 4,853E-01 |
| p | - | 50 | 20 | 60 | 100 | 100 | 60 |
| I_r | - | 26,1 | 42,9 | 20,8 | 16,8 | 16,8 | 5,4 |

Tabulka č. 16 – výsledky výpočtů pro nastavení I_r

9.2 Nastavení vypínacích časů

Ochrany musí zajistit vypnutí zkratového proudu dříve, než dojde k přehřátí jádra vodiče nad dovolenou mez a tím k vzniku možnosti jeho poškození. Pro výpočet maximální doby trvání zkratu T_{max} je rozhodujícím faktorem velikost ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} . Tento proud se vypočítá z maximálního rázového zkratového proudu I''_k a koeficientu k_e dle vztahu (3.33). Hodnota I''_k byla stanovena v rámci výpočtu zkratů v předcházejících bodech a hodnota koeficientu zvolena 1,02 pro dobu trvání zkratu do 1 sekundy. Oteplení kabelů z nejvyšší dovolené provozní teploty na mezní teplotu, způsobené průchodem zkratového proudu, nastane za dobu T_{max} , která se vypočte podle vzorce:

$$T_{max} = \left(\frac{K \cdot S}{I_{th}} \right)^2 \quad (s; -, mm^2, A) \quad (9.2)$$

| | |
|-----------|--|
| T_{max} | maximální doba trvání zkratu |
| S | průřez kabelu |
| I_{th} | ekvivalentní oteplovací proud |
| K | koeficient pro výpočet oteplení při zkratu |

| | |
|-----|---|
| 115 | pro Cu vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm ² , při počáteční teplotě 7000°C |
| 100 | pro Cu vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm ² , při počáteční teplotě 7000°C |
| 103 | pro Cu vodiče s izolací PVC, pro průřezy větší než 300 mm ² , při počáteční teplotě 7000°C |
| 86 | pro Cu vodiče s izolací PVC, pro průřezy větší než 300 mm ² , při počáteční teplotě 7000°C |
| 76 | pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm ² , při počáteční teplotě 7000°C |
| 66 | pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm ² , při počáteční teplotě 7000°C |
| 68 | pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy větší než 300 mm ² , při počáteční teplotě 7000°C |
| 57 | pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy větší než 300 mm ² , při počáteční teplotě 7000°C |
| 143 | Pro Cu vodiče s izolací ze síťovaného polyetylénu |
| 94 | Pro Al vodiče s izolací ze síťovaného polyetylénu |

Tabulka č. 17 – hodnoty koeficientu K pro výpočet oteplení při zkratu

Vypínací čas je součet vypínacího času vypínače a ochrany. Závisí tedy na typu vypínače, který zkrat odepíná. U nových moderních vypínačů se udává vypínací čas do 50 msec. Pro nastavení vypínacího času ochran pak bude platit:

$$T_{\text{ochrany}} \leq T_{\text{max}} - T_{\text{vypínače}} \quad (9.3)$$

Příklad výpočtu pro vývod z rozvodny KT kobky č. 5 dle vztahu (3.33) a (9.2):

$$I_{th} = \sqrt{(m+n)} \cdot I_k'' = \sqrt{1,02} \cdot 8,62 = 8,792 \text{ kA}$$

$$K = 76$$

$$S = 240 \text{ mm}^2$$

$$T_{\text{max}} = \left(\frac{K \cdot S}{I_{th}} \right)^2 = \left(\frac{76 \cdot 1 \cdot 240}{8,792} \right)^2 = 4,3 \text{ s}$$

9.2.1 Přehled výsledků výpočtů pro maximální dobu vypnutí zkratu

| číslo | Směr začátek | konec | Typ kabelu | Počet kabelů | S (sqmm) | I ^{''} k (kA) | T _{max} (s) |
|-------|-----------------|---------|---------------|-----------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| W1 | T3 | DS0101 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 4,75 | 3,54 |
| W2 | T1 | R20101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 13,14 | 1,85 |
| W3 | T4 | R20104 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 13,14 | 0,46 |
| W4 | T2 | R20112 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 9,08 | 3,88 |
| W5 | R20103 | Re1 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 13,14 | 1,85 |
| W18 | Re1 | KT0101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 8,62 | 4,30 |
| W6 | TG1 | R20105 | 6-AYKCY | 1 | 150 | 13,14 | 0,72 |
| W7 | TG2 | R20108 | 6-AYKCY | 1 | 150 | 9,08 | 1,52 |
| W8 | R20109 | Re2 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 9,08 | 3,88 |
| W19 | Re2 | OS10101 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 7,17 | 6,22 |
| W9 | R20110 | KT0112 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 9,08 | 3,88 |
| W10 | DS0107 | OS10102 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 9,08 | 3,88 |
| W11 | DS0106 | KT0116 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 9,08 | 3,88 |
| W12 | KT0113 | OS10119 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 8,62 | 4,30 |
| W13 | KT0114 | CV0101 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 8,62 | 1,08 |
| W14 | KT0115 | EX0101 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 8,62 | 1,08 |
| W15 | EX0109 | CV0110 | 6-AYKCY | 1 | 240 | 8,62 | 4,30 |
| W16 | OS10117 | ML0101 | 6-AYKCY | 1 | 150 | 7,17 | 2,43 |
| W17 | OS10116 | OS20101 | 6-AYKCY | 1 | 120 | 7,17 | 1,55 |
| W20 | R1 | T1 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 7,41 | 5,82 |
| W21 | R1 | T2 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 7,41 | 5,82 |
| W22 | R1 | T4 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 7,41 | 5,82 |
| W23 | R1 | T5 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 7,41 | 5,82 |
| W24 | R1 | T3 | 22-ANKTOPV | 1 | 240 | 7,41 | 5,82 |

Tabulka č. 18 – výsledky výpočtů pro maximální dobu vypnutí zkratu

V tabulce č. 18 jsou uvedeny maximální doby vypnutí zkratů na jednotlivých vývodech z rozvodu tak, aby nebylo překročeno dovolené oteplení kabelů vlivem působení nadproudů. Pro nastavení vypínacích časů zkratových ochran je potřeba od této hodnoty odečíst vypínací čas výkonových vypínačů, přičemž bude vyhověno požadavku dle vztahu (9.3).

9.3 Nastavení linkových ochran

Podle požadavku ČEZ Distribuce a.s. musejí být obě linkové ochrany nastaveny na následující hodnoty:

$U < 0,85 U_n$; 0,6 sec; všechny fáze

$U > 1,1 U_n$; 0,1 sec; všechny fáze

$f < 49,5$ Hz; 0,1 sec; všechny fáze

$f > 51$ Hz; 0,1 sec; všechny fáze

Vektor U 30 stupňů

$I > 140$ A ; 0,7 s

9.4 Nastavení ochran transformátorů

Ochrana proti přetížení stanovuje IEC 354 pro olejové transformátory takto:

Po dobu 30 minut je možno zatěžovat max. do výše $1,3I_n$.

Transformátor T1, T2: 22/6,3 kV, $S_n = 4 MVA$, $I_n = 105 A$

Ochrana proti přetížení: $I_r < 1,3I_n \Rightarrow I_r < 136,5 A$

Ochrana proti zkratu: $I_r < I_{k2min} \Rightarrow I_r < 0,485 kA$

Nastavení ochrany: 137 A / 0,5 s

Transformátor T4, T3: 22/6,3 kV, $S_n = 1,6 MVA$, $I_n = 42 A$

Ochrana proti přetížení: $I_r < 1,3I_n \Rightarrow I_r < 54,6 A$

Ochrana proti zkratu: $I_r < I_{k2min} \Rightarrow I_r < 0,485 kA$

Nastavení ochrany: 55 A / 0,5 s

10. Navržené typy ochran

| | |
|--------------------------------|-------------------|
| Transformátory T1, T2, T3, T4: | Areva MiCom P630C |
| Kabelové propoje: | Areva MiCom P122 |
| Přívodní linky vn 20, vn 15: | Areva MiCOM P341 |

Ochrana Areva MiCom P630C je navržena i pro transformátor T4 – 1,6 MVA, přestože pro něj diferenciální ochrana není předepsána, a to z důvodu jeho zásadního významu pro provoz závodu.

10.1 Stručná charakteristika ochran

Areva MiCom P630C – je diferenciální ochrana určená především pro transformátory, generátory a motory. Umožňuje blokadu vypnutí při zapínání transformátoru analýzou druhé harmonické. Pomocí teplotního modelu umožňuje přesné sledování skutečného zatížení transformátoru. Lze v ní programovat logické funkce pomocí bloků, umožňuje záznam měřených dat a komunikaci s nadřazeným řídicím systémem.

Areva MiCOM P341 – je speciální ochrana pro předávací místo výroben elektrické energie. Zajišťuje bezpečný paralelní chod výrobní a distribuční sítě pomocí funkcí df/dt a napěťový vector shift. Mimoto obsahuje standardní funkce jako je $U<$, $U>$, $I>$, $I>>$, $I>>>$, $f>$, $f<$, kontrola celistvosti obvodů měřících transformátorů napětí a proudu, funkce selhání vypínače vn, záznam poruch, záznam oscilogramu a komunikaci s nadřazeným řídicím systémem.

Areva MiCom P122 – je univerzální nadproudová a zkratová ochrana určená pro kontrolu, ochranu a monitorování průmyslových a veřejných distribučních sítí.

11. Zhodnocení současného stavu chránění

| | | |
|----------------------|--------|---------------|
| Linka VN 15 | AT 31X | 140 A / 1,1 s |
| Linka VN 20 | AT 31X | 140 A / 1,1 s |
| Transformátor T1, T2 | AT 31X | 165 A / 0,8 s |
| Transformátor T3 | AT 31X | 55 A / 0,5 s |
| Transformátor T4 | AT 31X | 65 A / 0,6 s |

Současně užívanými typy ochran jsou elektromechanické ochrany AT 31X. Porovnáním nastavených hodnot s výpočtovými hodnotami vyplývá, že kromě transformátoru T3 jsou všechny hodnoty překročeny a zařízení není chráněno požadovaným způsobem. V případě přírodních linek navíc ochrany AT 31X neumožňují chránění ve všech parametrech, které požaduje ČEZ Distribuce.

12. Závěr

V této diplomové práci je řešen návrh a nastavení elektrických ochran, pomocí výpočtu zkratových poměrů je posouzena zkratová odolnost rozvodu podnikové sítě cukrovaru Opava. V práci je dále návrh nastavení elektrických ochran, zejména pro vedení a transformátory, na základě výsledků provedených výpočtů. Dle požadavku zadavatele byly vytipovány ochrany z produkce firmy Areva.

Navržené řešení zohledňuje specifika cukrovarnického provozu, kdy pro období výroby a zpracování cukru je provozována technologie zcela odlišně oproti stavu mimokampaňovému. Při řešení byla zohledněna skutečnost odlišného způsobu provozu závodu a s tím související konfigurace sítě. Pro rychlou orientaci v prováděných řešeních práce obsahuje jednoduchá schémata a popisy propojení rozvodu v závislosti na potřebách výroby.

Výpočty maximálních a minimálních zkratových proudů jsou prováděny na základě schémat uvedených v přílohách č. 1 až č. 15. Vzhledem k rozsahu výpočtů bylo řešení prováděno programem Microsoft Excel, kde je možno sledovat výsledky výpočtových mezikroků, konečné výsledky potřebné pro návrhy a nastavení jsou uvedeny v přehledných tabulkách kapitoly 9.

Z uvedených tabulek vyplývá, že hodnota nárazového zkratového proudu i_p vychází největší u provozní varianty č. 1. V porovnání s hodnotou I_{dyn} uváděnou výrobcem rozvaděčů je nárazový zkratový proud vždy menší a nedochází k překročení zkratové odolnosti zařízení a nebezpečí poškození vlivem dynamického namáhání zkratovými proudy.

Další část diplomové práce řeší nastavení zkratových ochran. Pro stanovení hodnoty rozběhového proudu ochran se vychází z minimálních zkratových výpočtů bez uvažování vlivů asynchronních motorů a při zadání dvoufázových zkratů v jednotlivých uzlech rozvodu vn. Výpočtem bylo ověřeno,

že je třeba provést nastavení podle varianty ostrovního provozu bez příspěvků distribuční sítě. Kritériem pro stanovení vypínacích časů ochran je dodržení maximálního dovoleného oteplení kabelů, jež je vyjádřeno maximální velikostí rázového zkratového proudu přepočteného na proud I_{th} .

Porovnáním těchto výsledků s nastavení původních elektromechanických zkratových ochran bylo zjištěno, že ve většině případů nebyly dodrženy podmínky selektivity ani dodržení dovoleného oteplení jader vodičů a nastavení vycházelo z historických zvyklostí, které nebyly doložitelné žádným seriózním a technicky odůvodnitelným způsobem.

V této diplomové práci jsem využil teoretické poznatky získané při studiu v plné šíři, která byla nezbytná pro komplexní řešení celé podnikové sítě a všech prvků, které se v ní nacházejí.

Seznam literatury:

- [1] Santarius P., Elektrické stanice a vedení, skripta VŠB Ostrava 2002
- [2] Krychtálek Z., Pauza J.: Elektrické stanice, SNTL 1989
- [3] Pauza J.: Silnoprúdová rozvodná zařízení v průmyslu, SNTL 1974
- [4] Grym R., Hochman P., Machoň J., Bermann J., Cichoň B.: Chránění II. IRIS 2004
- [5] Haluzík, E.: Ochrany a automatiky v elektrických sítích. Skriptum VUT Brno, 1985
- [6] Krejčí P.: Cvičení z elektroenergetiky. VŠB-TUO 2003
- [7] ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002
- [8] Technická dokumentace MSC a.s., odštěpný závod Opava
- [9] Katalog kabelů nkt cables Kladno a Velké Meziříčí

Seznam příloh:

1. Přehledové schéma rozvodu závodu pro variantu č. 1
2. Náhradní schéma pro variantu č. 1
3. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 1.1
4. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 1.2
5. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 1.3
6. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 1.4
7. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 1.5
8. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 1.6
9. Přehledové schéma rozvodu závodu pro variantu č. 1
10. Náhradní schéma pro variantu č. 2
11. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 2.1
12. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 2.2
13. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 2.3
14. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 2.4
15. Náhradní schéma pro výpočet zkratových proudů pro variantu č. 2.5
16. Náhradní schéma pro variantu č. 3